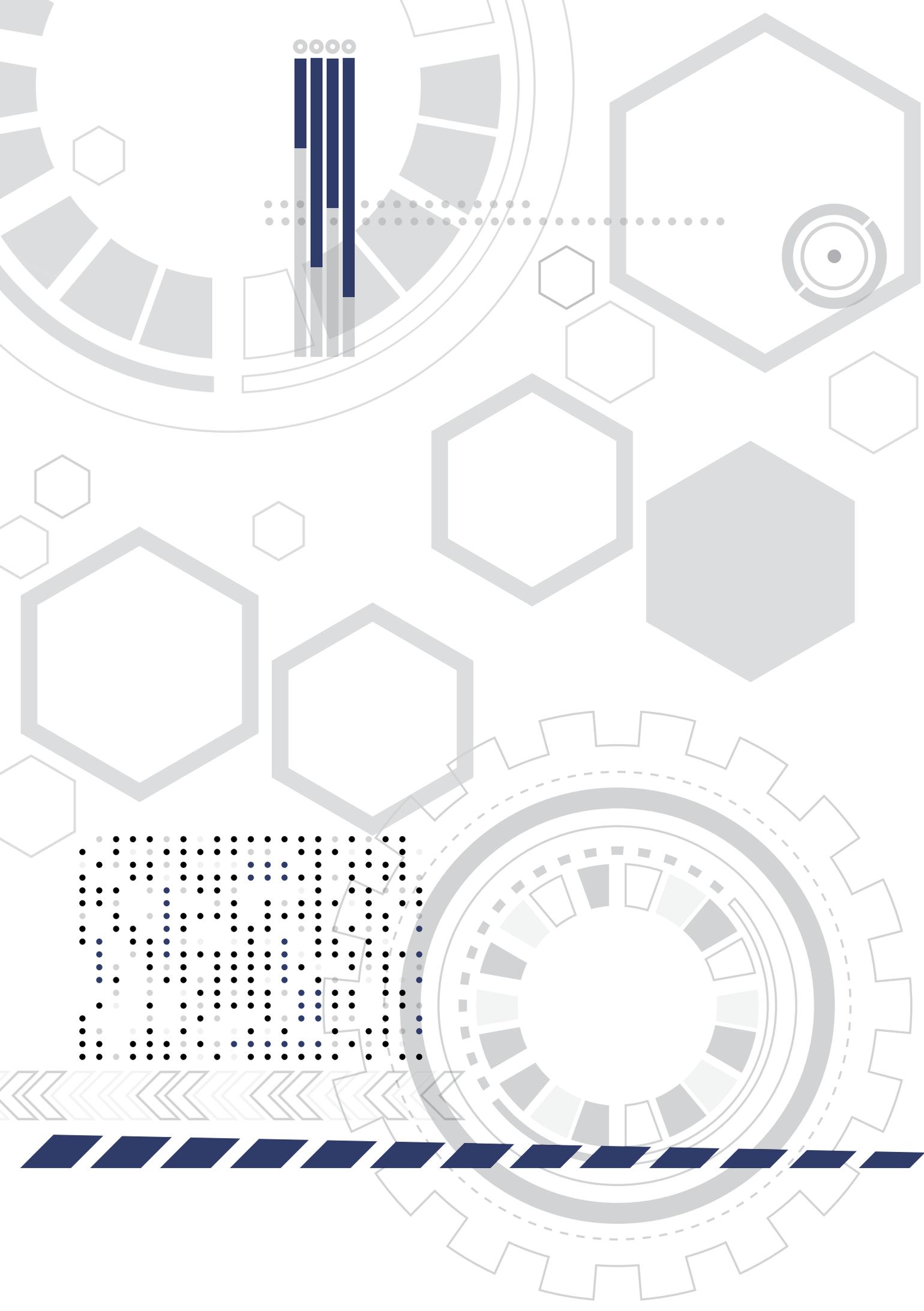




ФГАУ «НИИ «ЦЭПП»

Федеральное Государственное Автономное Учреждение
«Научно-Исследовательский Институт
«Центр Экологической Промышленной Политики»



ЭНЦИКЛОПЕДИЯ ТЕХНОЛОГИЙ



ЭВОЛЮЦИЯ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ
РЕСУРСНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Москва • Санкт-Петербург
2019

УДК 67.01
ББК 30.606
Э68

Главный редактор
кандидат экономических наук *Д. О. Скобелев*

Энциклопедия технологий. Эволюция и сравнительный анализ ресурсной эффективности промышленных технологий / [гл. ред. Д. О. Скобелев] ; ФГАУ «НИИ «ЦЭПП». — М. ; СПб. : «Реноме», 2019. — 824 с. : ил.

ISBN 978-5-00125-250-4

Коллективная монография «Энциклопедия технологий» создана с целью изучения процесса возникновения и становления отраслей промышленности и состоит из трех частей «Развитие технологий добычи полезных ископаемых», «Развитие технологий обрабатывающих производств» и «Развитие технологий переработки вторичных ресурсов». Рассмотрены основные циклы развития отраслей и технологий, причины перехода на новый качественный этап, определены ключевые показатели ресурсной эффективности.

В рамках данной монографии технологии рассматриваются (и сравниваются) с применением метода «черного ящика», имеющего входные данные («вход») — сырье, энергия, вода и так далее, и «выход» — количество и качество произведенной продукции, выбросы, сбросы, отходы. При этом под термином «технология» понимается последовательность действий (операций), производимая при определенных условиях на основном и вспомогательном оборудовании, посредством которых происходит преобразование исходных ресурсов в продукцию (результат).

«Энциклопедия технологий» должна стать первым шагом на пути к формированию подходов по оценке ресурсной эффективности производства, которая основывается на объективных показателях сравнения технологий в различных отраслях промышленности.

УДК 67.01
ББК 30.606

ISBN 978-5-00125-250-4

© ФГАУ «НИИ «ЦЭПП», 2019
© Авторы, 2019
© Оформление. ООО «Реноме», 2019

Василий Сергеевич Осьмаков

Заместитель министра промышленности и торговли Российской Федерации, руководитель федерального проекта «Внедрение наилучших доступных технологий»



В РОССИИ концепцию наилучших доступных технологий изначально предполагали применить для совершенствования государственного регулирования в природоохранной сфере. Убежденность в правильности такого подхода основывалась на более чем тридцатилетнем опыте Европейского союза. В 2014 г. наша страна столкнулась с новыми вызовами. Предстояло решать задачи модернизации и повышения конкурентоспособности промышленности и импортозамещения. При этом экологические вопросы с повестки дня не снимались.

За основу нового подхода была положена идея двойного выигрыша. Из основных позиций промышленной экологии, прикладной науки советской школы, был взят тезис о том, что наибольший природоохранный эффект в промышленности дает совершенствование технологий производства.

Переход на принципы НДТ представляет собой поэтапный процесс согласованных и предсказуемых изменений регуляторных требований к экологичности и ресурсной эффективности промышленности. При этом согласование достигается на основе открытого обсуждения со всеми заинтересованными участниками — бизнесом, регуляторами, контрольно-надзорными органами, научными организациями и профессиональными ассоциациями и союзами.

Концепция НДТ — это механизм сравнительного анализа таких сложных объектов, как промышленные технологии. На основании результатов этого сравнения можно принимать решения по следующим направлениям:

- определение условий комплексных экологических разрешений;
- реализация проектов «зеленого» финансирования и других форм поддержки промышленности;
- выполнение обязательств ряда международных договоров и конвенций;
- разработка программ отраслевого и регионального развития и пр.

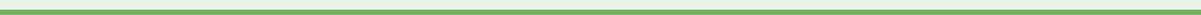
Примечательно, что концепция НДТ за рубежом также содержательно сдвигается к категории промышленного развития и модернизации. Наглядным доказательством служит разрабатываемый рабочей группой Организации экономического сотрудничества и развития руководящий документ по НДТ, где вместе с показателями эмиссий появились показатели ресурсной эффективности.

Переход на принципы НДТ только начинается. Разработаны основные правила и механизмы. Предстоит большая работа по их отладке с учетом отраслевой и региональной специфики. Необходимо создать инструменты количественного определения действенности проводимой политики, а для этого потребуются новые макропоказатели, индикаторы и методики их оценки.

В рамках федерального проекта «Внедрение наилучших доступных технологий» предстоит актуализировать информационно-технические справочники. И здесь крайне важна релевантная оценка затрат на соблюдение ужесточенных требований. Решения должны приниматься обоснованно и взвешенно.

Предлагаемая вниманию читателей «Энциклопедия технологий» представляет собой попытку синтеза знаний, полученных в процессе работы технических рабочих групп и экспертных дискуссий на различных площадках. Предметом данного исследования являются промышленные технологии и их эволюция.

Надеюсь, что это издание поможет найти правильные ответы на многие вопросы, возникающие в процессе реализации федерального проекта «Внедрение НДТ».



Алексей Александрович Ученюв

Директор Департамента стратегического развития и корпоративной политики Минпромторга России, администратор федерального проекта «Внедрение наилучших доступных технологий»



В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ промышленная политика и экологическая реформа бизнеса тесно взаимосвязаны. Экологическая направленность модернизации промышленных технологий на более рациональное использование ресурсов стимулирует развитие новых технологических процессов и создание инновационных видов продукции и услуг. Нельзя недооценивать роль регуляторных факторов в развитии технологий.

В истории немало примеров тому, что технологические процессы и продукты завершили свой жизненный цикл именно под давлением международных или национальных систем регулирования.

С учетом этого аспекта Минпромторг рассматривает начавшийся переход на государственное регулирование в промышленной и природоохранной сферах. Необходимо обеспечить привлечение инвестиций в технологическую модернизацию промышленности с целью повышения ее ресурсной эффективности, а в ряде случаев — замены ресурсов и, как следствие, снижения негативного воздействия на окружающую среду.

Такая работа проводится в рамках федерального проекта «Внедрение наилучших доступных технологий».

За истекшие пять лет создана иная, не во всем привычная регуляторная конструкция, базирующаяся на принципе постоянного, предсказуемого и согласованного со всеми участниками ужесточения требований. Впервые в истории государственного регулирования в России законодательство создано на основе открытого диалога всех заинтересованных сторон.

Наступил этап ее экспериментальной отработки. Первые пилотные объекты должны получить новый в российской правоприменительной практике документ — комплексное экологическое разрешение.

Все, кто по разным причинам не смог принять участие в создании новой системы регулирования, приглашены к ее отладке и совершенствованию. Запущен процесс актуализации информационно-технических справочников наилучших доступных технологий, проводятся различные мероприятия по разъяснению принципов НДТ и подготовке кадров, идет налаживание взаимодействия всех участников.

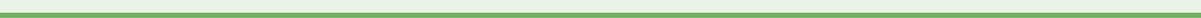
Как известно, хорошо управлять можно только тем, что поддается измерению. Для оценки действенности проводимой экологической промышленной политики было бы очень полезно научиться количественно измерять уровень развития технологии. Задача не решена в общей постановке до настоящего времени нигде в мире.

Однако в процессе разработки 51 информационно-технического справочника в Бюро НДТ было накоплено большое количество сведений об используемых и перспективных производственных технологиях. На основании систематизации этого материала в приложении к областям применения НДТ можно проследить эволюцию технологий и определить количественные показатели их ресурсной эффективности, которые в общем отражают степень зрелости технологии, и, в конечном счете, сформировать методологическую базу обоснования выбора технологических показателей.

Экспертные дискуссии и широкое общественное обсуждение российских подходов к обоснованию выбора НДТ привели к мысли о разработке «Энциклопедии технологий».

Как возникали, совершенствовались и почему уходили в прошлое технологии, обеспечивавшие некогда расцвет общества? Какие технологические процессы выдержат проверку временем и смогут перейти на следующие технологические уклады? — эти и многие другие вопросы рассмотрены на страницах данного коллективного труда.

Предлагаемое вниманию первое издание «Энциклопедии технологий» адресовано всем заинтересованным лицам, занятым в процессе создания новых и реконструкции существующих предприятий.



Владимир Александрович Грачев

Президент Неправительственного экологического фонда им. В. И. Вернадского, председатель Научного совета РАН по глобальным экологическим проблемам



ВНЕДРЯЕМОЕ В РОССИИ новое государственное регулирование на принципах наилучших доступных технологий ориентировано на стимулирование промышленности к экологической модернизации. В своей основе это регулирование содержит процесс выдачи единого разрешительного документа, так называемого комплексного экологического разрешения. В рамках этой конструкции всевозможные обременения или послабления со стороны государства к хозяйствующему субъекту зависят в значительной степени от результата сравнения заявляемой им технологии производства с некоторым эталоном, называемым «наилучшая доступная технология» в данной отрасли промышленности. Этот эталон предсказуемым образом должен периодически актуализироваться, что будет мотивировать хозяйствующих субъектов внедрять более эффективные решения в организации производственных процессов.

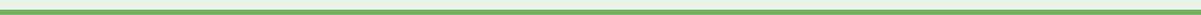
При кажущейся простоте регуляторной конструкции для ее реализации необходимо найти ответы на ряд совсем непростых вопросов:

- При актуализации справочников НДТ насколько целесообразно ужесточать технологические показатели и каковы будут затраты на их достижение?
- Как выбрать достаточный набор маркерных показателей, чтобы повысить эффективность контроля эмиссий?
- Какими показателями можно измерить ресурсную эффективность отрасли и региона, а также страны в целом, чтобы оценить действенность проводимой экологической промышленной политики?
- Как организовать оценивание производственных технологий в контексте устойчивого развития?

и многие другие, которые требуют серьезных научных исследований и разработок.

Созданный в 2018 г. Научный совет РАН по глобальным экологическим проблемам объединил ведущие научные организации, при взаимодействии которых появилась возможность сформировать экспертное сообщество в области НДТ. Усилия экспертного сообщества необходимо сконцентрировать на разработке объективных критериев оценки НДТ и прозрачного процесса установления требований. От того, насколько успешно будут решаться эти задачи, во многом зависят результаты эколого-технологической модернизации отечественной промышленности.

Надеюсь, что «Энциклопедия технологий» будет полезной широкому кругу читателей и внесет свой вклад в становление экспертного сообщества НДТ.



Часть первая

**РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ДОБЫЧИ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**



ДОБЫЧА И ОБОГАЩЕНИЕ УГЛЯ

Александр Владимирович Григорьев

АНО «ИПЕМ», зам. генерального директора, кандидат экономических наук

Илья Сергеевич Курошев

Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики»,
начальник отдела металлургической, нефтегазовой и горнорудной промышленности

ВВЕДЕНИЕ

Уголь представляет собой горючую осадочную породу, которая состоит преимущественно из углерода с содержанием минеральных примесей (силикаты, карбонаты, сульфиды и т. д.¹) и других химических элементов (водород, кислород, азот и др.). Ископаемый уголь может быть экономически выгодно использован или в качестве энергетического топлива, или в качестве одного из видов технологического сырья.

В зависимости от значений показателя отражения витринита², теплоты сгорания (на влажное беззольное состояние) и выхода летучих веществ (на сухое беззольное состояние) выделяют три вида угля:³

- бурый уголь;
- каменный уголь;
- антрацит.

Данные виды угля различаются и по степени метаморфизма⁴. Бурый уголь характеризуется низкой стадией метаморфизма, низким содержанием углерода и низкой теплотой сгорания. Каменный уголь характеризуется средней стадией метаморфизма, средним содержанием углерода и более высокой теплотой сгорания. Максимальной стадией метаморфизма и максимальным содержанием углерода отличается антрацит. В зависимости от ряда параметров угли подразделяют на технологические марки (табл. 1.1).

В качестве энергетического топлива широко используются угли марок Д, ДГ, Г, СС, Т, Б, А. Основным видом использования угля как технологического сырья является производство каменноугольного кокса, который применяется в черной металлургии. Для слоевого коксования могут применяться угли следующих марок: К, КЖ, Ж, ГЖ, ОС, Г, КС, КСН, ДГ, ТС, СС.

Для различных углехимических процессов могут использоваться угли различных марок: угли марки Г подходят для газификации, марки Б — для выделения гуминовых веществ, марок Д, ДГ, Г, ГЖ — для производства синтетического жидкого топлива, марки А — для производства карбида кремния и карбида алюминия⁵. Антрацит (марка А) может также применяться в определенных технологических процессах металлургических предприятий и для производства электродов.

¹ Рашевский В. В. Качество углей ОАО «СУЭК». — М. : Кучково поле, 2011. — С. 28.

² Витринит — гелифицированный компонент ископаемых углей.

³ Согласно ГОСТ 25543–2013. Угли бурые, каменные и антрациты. Классификация по генетическим и технологическим параметрам, с изменениями.

⁴ Метаморфизм — изменение в структуре и составе горных пород под действием химических и физических причин.

⁵ Рашевский В. В. Качество углей ОАО «СУЭК». — С. 37–39.

Таблица 1.1. Технологические марки угля⁶

Вид угля	Наименование марки	Обозначение марки
Бурый	Бурый	Б
	Длиннопламенный	Д
Каменный	Длиннопламенный газовый	ДГ
	Газовый	Г
	Газовый жирный отощенный	ГЖО
	Газовый жирный	ГЖ
	Жирный	Ж
	Коксовый жирный	КЖ
	Коксовый	К
	Коксовый отощенный	КО
	Коксовый слабоспекающийся низкометаморфизованный	КСН
	Коксовый слабоспекающийся	КС
	Отощенный спекающийся	ОС
	Тощий спекающийся	ТС
	Слабоспекающийся	СС
	Тощий	Т
	Антрацит	Антрацит

В зависимости от размеров кусков, получаемых при добыче, каменный уголь делится на ряд классов (табл. 1.2).

Таблица 1.2. Классы крупности угля⁷

Класс крупности		Размер кусков, мм
П	Плитный	100–200 (300)
К	Крупный	50–100
О	Орех	25–50
М	Мелкий	13–25
С	Семечко	6–13
Ш	Штыб	0–6
Р	Рядовой	0–200 (300)

Одной из важнейших характеристик угля как энергетического топлива является удельная теплота сгорания (измеряется в джоулях на килограмм). Значение данного показателя изменяется в широких пределах и зависит как от свойств и состава органической массы, так и от зольности и влажности углей. Различают высшую и низшую удельную теплоту сгорания⁸.

Качество коксующихся углей зависит от множества показателей. Определение важнейших показателей для них осложняется тем, что угольная шихта для коксования формируется из углей различных марок, которые по-разному влияют на характеристики шихты. В качестве

⁶ Согласно ГОСТ 25543–2013. Угли бурые, каменные и антрациты. Классификация по генетическим и технологическим параметрам, с изменениями.

⁷ Согласно ГОСТ 19242–73. Угли бурые, каменные и антрацит. Классификация по размеру кусков, с изменениями.

⁸ Рашевский В. В. Качество углей ОАО «СУЭК». — С. 26.

главного свойства коксующихся углей рассматривают их спекаемость, т. е. способность переходить в пластическое состояние. Для оценки спекаемости существует много различных методов, подавляющее большинство которых основано на определении различных параметров пластической массы (свободное вспучивание, пластометрический метод, dilatометрия по методу Адилера — Арну, метод Рога, метод Грей — Кинга и др.)⁹. В рамках одного из методов — пластометрического — рассматриваются такие показатели, как толщина пластического слоя, величина пластометрической усадки, виды пластометрической кривой¹⁰.

При оценке содержания вредных минеральных примесей обычно рассчитывают содержание серы и зольность. Распространенным параметром также является влажность угля.

УГЛЕДОБЫВАЮЩИЕ ПРЕДПРИЯТИЯ РОССИИ

По данным Минэнерго России, по состоянию на 1 января 2018 г. добычу угля осуществляли 161 угольное предприятие, в том числе 53 угольные шахты и 108 разрезов¹¹. В то же время по данным угольных компаний и ФГУП «ЦДУ ТЭК» была собрана информация о 207 угледобывающих предприятиях (в том числе 56 шахтах и 151 разрезе), действующих по состоянию на конец 2018 г. (табл. 1.3).

Согласно собранным данным в период с 2000 г. в России было открыто или восстановлено 56 разрезов и 20 шахт, что составляет 37% и 32% соответственно от их общего количества. При этом 25 из 56 новых разрезов, а также 17 из 20 новых шахт были открыты в Кемеровской области.

Таблица 1.3. Угледобывающие предприятия России (по состоянию на конец 2018 г.)

Субъект РФ	Угольный бассейн	Марка угля	Разрезы	Шахты	Обогатительные фабрики	Добыча угля в 2018 г., млн т
Тульская обл.	Подмосковный	Б	1	–	–	0,2
Мурманская обл.	Архипелаг Шпицберген	Ж	–	1	–	0,1
Республика Коми	Печорский	К, Ж, ГЖО	1	4	3	9,5
		Д	–	1	1	0,4
Ростовская обл.	Донецкий	А	–	4	3	5,4
Оренбургская обл.	Южно-Уральский	Б	1	–	–	< 0,1
Новосибирская обл.	Горловский	А	3	–	2	14,5
Республика Хакасия	Минусинский	Д, ДГ, Г	8	–	2	23,0
Кемеровская обл.	Кузнецкий	А, Т, ТС, ОС, СС, К, КС, КСН, КО, КЖ, Д, ДГ, Г, ГЖ, ГЖО, Ж	59	42	44	255,7
	Канско-Ачинский	Б	2	–	–	0,3

⁹ Там же. — С. 32.

¹⁰ ГОСТ 1186–2014. Угли каменные. Метод определения пластометрических показателей.

¹¹ Уголь: Об отрасли // Министерство энергетики Российской Федерации : [официальный сайт]. — URL: <https://minenergo.gov.ru/node/433> (дата обращения: 29.10.2019).

Таблица 1.3 (окончание)

Субъект РФ	Угольный бассейн	Марка угля	Разрезы	Шахты	Обога- тельные фабрики	Добыча угля в 2018 г., млн т
Красноярский край	Канско-Ачинский	Б	9	–	–	40,4
		ДГ	1	–	–	1,4
	Тунгусский	Д, Т	2	–	–	
Иркутская обл.	Иркутский	Б	3	–	–	7,7
		Д, Г	7	–	1	6,4
	Тунгусский	Д	1	–	–	
Республика Тыва	Улуг-Хемский	Ж, ГЖ	3	1	–	1,8
Республика Бурятия	Месторождения Бурятии и Забай- кальского края	Б	4	–	–	3,0
		Д	2*	–	1*	2,3*
Забайкальский край	Месторождения Бурятии и Забай- кальского края	Б	7	–	–	8,7
		Д	1*	–	–	12,8*
		Ж, ГЖ	1	–	–	
Амурская обл.	Нижнезейский	Б	2	–	–	3,6
	Буреинский	Д	1	–	–	0,1
Хабаровский край	Буреинский	Г	2	1	2	6,1
Приморский край	Бикино-Уссурийский	Б	4	–	–	7,8
	Раздольненский	Б	1	–	–	
		Д	1	–	1	0,6
Республика Саха (Якутия)	Южно-Якутский	К, Ж	5	–	4	17,2
	Зырянский	Ж	1	–	–	
	Ленский	Д	3	–	–	0,3
		Б	3	–	–	
Сахалинская обл.	Сахалинский	Б	4	–	–	8,5
		Д, ДГ	4	–	–	2,3
Камчатский край	Месторождения севера Дальнего Востока	Б	1	–	–	< 0,1
ВСЕГО	–	–	149	55	64	439,1**

Примечания:

* Тугнуйский и Никольский разрезы с обогатительной фабрикой в различных источниках относят либо к Бурятии, либо к Забайкальскому краю. В данной таблице они учтены в Бурятии, но большая часть добычи угля по данным Росстата учитывается по Забайкальскому краю.

** Расхождение суммы по регионам с итоговым значением по России связано с округлением.

Добыча угля указана по данным Росстата¹², журнала «ТЭК России»¹³ и прочих источников. Количество предприятий указано по данным угольных компаний и прочих источников.

¹² Производство важнейших видов промышленной продукции по отраслям экономики в январе — декабре 2018 г. / Росстат; НИУ «ВШЭ». — URL: http://sophist.hse.ru/rstat_data/ecbase/prvid122018/%D0%9A-2_53_10_1029_%D0%BF%D1%83%D0%B1%D0%BB.xls (дата обращения: 04.01.2019).

¹³ Итоги производственной деятельности отраслей ТЭК в январе — декабре 2018 года // ТЭК России. — 2019. — № 1. — С. 53–100.

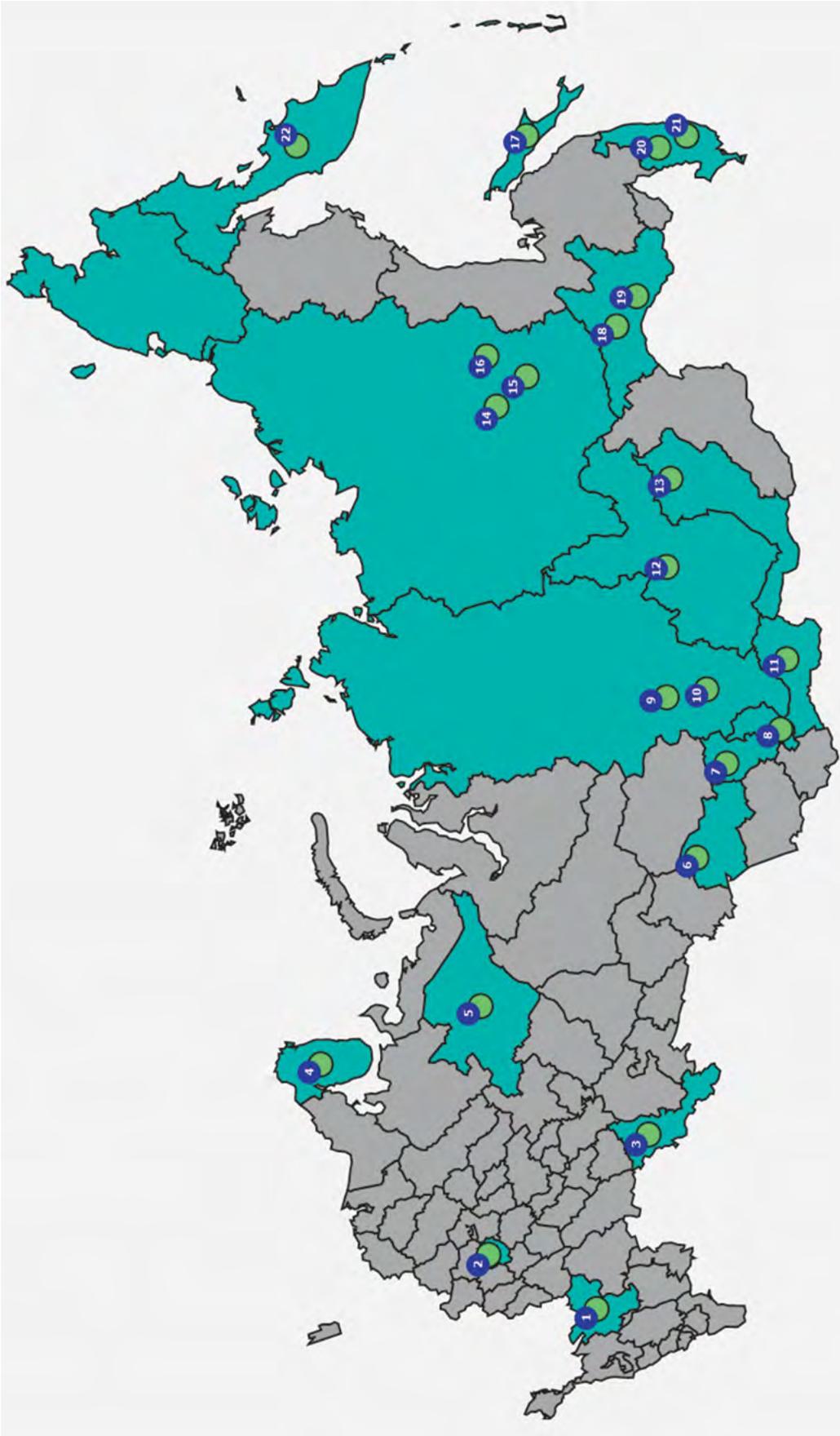


Рис. 1.1. Карта-схема расположения угольных бассейнов Российской Федерации:

- 1 — Донецкий бассейн; 2 — Подмосковный бассейн; 3 — Южно-Уральский бассейн; 4 — Архипелаг Шпицберген; 5 — Печорский бассейн; 6 — Горловский бассейн; 7 — Кузнецкий бассейн; 8 — Минусинский бассейн; 9 — Канско-Ачинский бассейн; 10 — Тунгусский бассейн; 11 — Улуг-Хемский (Черемховский) бассейн; 12 — Иркутский (Черемховский) бассейн; 13 — месторождения Бурятии и Забайкалья; 14 — Южно-Якутский бассейн; 15 — Зырянский бассейн; 16 — Ленский бассейн; 17 — Сахалинский бассейн; 18 — Нижне-Зейский бассейн; 19 — Бурейнский бассейн; 20 — Бикино-Уссурийский бассейн; 21 — Раздольненский бассейн; 22 — месторождения севера Дальнего Востока

ИСТОРИЯ ЗАРОЖДЕНИЯ УГЛЕДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Зарождение угледобывающей промышленности в мире

Добыча угля — одна из древнейших отраслей горной промышленности. Прimitивная добыча велась уже в Древнем Китае и античной Греции, где он использовался в качестве топлива. Об этом свидетельствует упоминание в трудах ученика Аристотеля Теофраста, который в 315 г. до н. э. называл уголь «горящими камнями» — «антраксом» (позднее появилось название «антрацит»).

Каменный уголь использовался и в средневековой Европе: одно из первых документированных упоминаний о применении угля для обогрева жилищ относится к Франции 1095 г.¹⁴ В 1537 г. в Цвиккау (территория нынешней земли Саксония¹⁵) основано первое товарищество для добычи каменного угля¹⁶. Первый фундаментальный труд по горному делу был написан в Средние века в Западной Европе Агриколой (XV в.) и содержал подробное описание принципов вскрытия месторождений, способов крепления стволов шахт, применявшихся в то время орудий труда, способов транспортировки добытых полезных ископаемых на поверхность земли.

За период развития угольной промышленности технологический процесс добычи угля значительно трансформировался. Можно выделить основные технологические способы добычи угля:

- с применением ручного труда (с помощью кайла, обушка, лопаты);
- с применением ручного труда и паровых машин (в основном для водоотлива и транспортировки угля);
- с применением механических приспособлений;
- с применением электрооборудования для основных процессов добычи и транспортировки угля.

Первые горные выработки имели глубину 3–4 метра, подъем и спуск в которых осуществлялся с помощью камней-ступеней или по наклонному тоннелю. Рост спроса на уголь привел к расширению горных выработок и увеличению глубины до 20–30 метров: углубляться дальше обычно мешала грунтовая вода. Одним из первых механизмов для подъема воды из шахты были нории¹⁷, для работы которых использовалась сила домашних животных. К XVII в. по мере развития технологий водоотлива и крепления выработок глубина строительства шахт была увеличена до 120 метров.

С XVII–XVIII вв. облик угольной отрасли стал качественно изменяться. Если ранее добыча угля осуществлялась исключительно с применением ручного труда и силы животных (например, для транспортировки угля и водоотвода), то в этот период появляются новые технологии (применение паровых машин для откачки воды и подъема угля, появление новых способов проходки стволов шахт, отбойка твердых пород порохом¹⁸).

Применение паровых машин значительно ускорило подъем воды из шахт: паровая машина, делавшая около 10 подъемов в минуту, выкачивала количество воды, для удаления которой ранее требовалось около 50 лошадей¹⁹. Увеличилась не только глубина, но и длина горных выработок, в связи с чем стали использоваться вагонетки.

¹⁴ Губанов В. А. Этапы развития угольной промышленности: технико-технологический аспект // Экономика. Право. Менеджмент. — 2014. — Вып. 2 (2). — URL: <http://izdatelstvo.bgu.ru/epm/dl.ashx?id=1396> (дата обращения: 04.01.2019).

¹⁵ Земля в составе ФРГ.

¹⁶ Германия // Горная энциклопедия. — URL: <http://www.mining-enc.ru/g/germaniya/> (дата обращения: 04.01.2019).

¹⁷ Нория — подъемно-транспортирующее устройство непрерывного действия с рабочим органом в виде замкнутой цепи или ленты с закрепленными ковшами (или черпаками) для захвата и перемещения жидкостей и сыпучих материалов (вертикально либо под углом 60–80°). Максимальная высота подъема, как правило, не превышает 60 м. Цит. по: Большая Российская энциклопедия. — URL: https://bigenc.ru/technology_and_technique/text/2671021 (дата обращения: 04.01.2019).

¹⁸ Грунь В. Д. История угледобычи в России / под общ. ред. Б. Ф. Братченко. — М., 2003.

¹⁹ Паровые машины // Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона. — СПб., 1897. — Т. XXII^а.

Увеличение глубины шахт сделало малоэффективной естественную приточную вентиляцию горных выработок, что в сочетании с применением открытого огня для освещения повлекло за собой череду взрывов метана и угольной пыли. Сократить аварийность в шахтах получилось в 1815 г. с изобретением предохранительной лампы Дэви, которая в дальнейшем была модернизирована в прототип анализатора присутствия взрывоопасных газов в воздухе горных выработок.

Первые попытки механизации технологических процессов за рамками паровых машин относятся к середине XIX в. В этот период были созданы первые врубовые машины, среди которых наиболее перспективными оказались цепные, применявшиеся вплоть до начала XX в. Другим важным нововведением в области добычи угля было применение качающихся, скребковых и ленточных конвейеров. Особое практическое значение это изобретение приобрело к концу XIX — началу XX в. в связи с эксплуатацией маломощных пластов, разработка которых невозможна с использованием вагонеток²⁰.

Совершенствование инструментов, применявшихся для добычи угля, особенно быстро происходило после появления электропривода, что позволило решить проблему механизированной откатки под землей. Впоследствии электроприводом стали оснащаться комбайны для выемки угля, транспортные средства, подъемные устройства, системы вентиляции и водоотлива шахт. Внедрение двигателей внутреннего сгорания (ДВС) привело к распространению самосвалов и экскаваторов (хотя одноковшовый паровой экскаватор на рельсовом ходу был изобретен еще в 1834 г.), что позволило организовать добычу угля открытым способом, характеризующимся высокой производительностью труда²¹.

Мировым лидером в угледобыче долгое время была Великобритания. Уже к XIV в. на ее территории добывалось больше всего каменного угля в Европе, однако по современным меркам объемы добычи оставались низкими. Широкое распространение уголь получил в Англии XVII в. по причине нехватки промышленной древесины, однако резкий рост угледобычи и повышение важности угольной отрасли в экономике страны произошли позднее — в середине XVIII в. под влиянием перехода к плавке чугуна на угольном коксе.

Великобритания, обладавшая самыми передовыми технологиями угольной отрасли, долгое время занимала первое место в мире по объемам добычи: доля страны в мировой угледобыче в середине XIX в. составляла 65%. К 1913 г. доля Великобритании на мировом рынке снизилась до 22% в связи с бурным ростом угольной промышленности в других странах (в основном, в Германии и США) (рис. 1.2). В течение XX в. стремительный рост объемов угледобычи продемонстрировали СССР и Австралия, а в начале XXI в. — Китай, Индия и Индонезия.

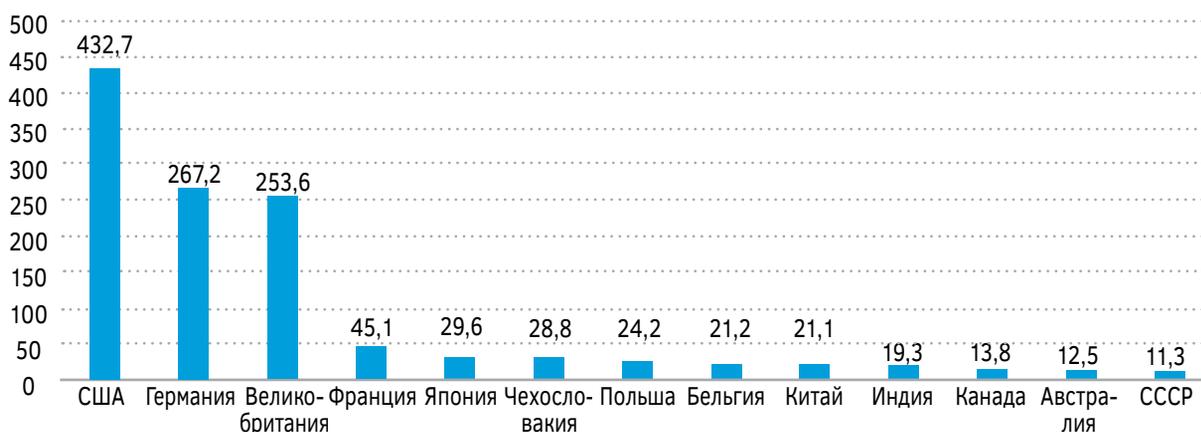


Рис. 1.2. Добыча ископаемого угля в основных угледобывающих странах в 1922 г.²²

²⁰ Введение в специальность. Основы экономики топливно-энергетического комплекса : учеб. пособие. — М. : Изд. дом МЭИ, 2009.

²¹ Там же.

²² Грунь В. Д. История угледобычи в России.

Совершенствование технологического процесса добычи угля было направлено на повышение производительности труда, а также на добычу угля в более сложных геолого-географических условиях, поскольку месторождения с наиболее пригодными для добычи условиями вырабатывались в первую очередь и объем доступных запасов угля сокращался. В то же время эволюция технологического процесса добычи угля способствовала повышению безопасности процесса добычи, улучшению качественных характеристик угля и степени его извлечения.

Зарождение угледобывающей промышленности в России

Россия значительно позже европейских стран приступила к промышленному освоению добычи угля. Первые сведения о поиске и разведке ископаемых углей в России относятся к началу XVIII в., когда Петром I были организованы специальные экспедиции в различные районы страны. В Донбассе залежи каменного угля были открыты в 1721 г. (в районе современных городов Лисичанск и Шахты). Добывавшийся здесь уголь использовался в солеварном и кузнечном деле. В 1721 г. были также обнаружены угольные месторождения на реке Томь (Кузбасс) и в Центральной России (Подмосковный бассейн). Первые угольные шахты в России появились на Урале (в районе современного г. Кизел), в районе Тулы, на Украине (в районе современного Лисичанска: построенная здесь шахта стала выдавать уголь в 1796 г. и была основным угледобывающим предприятием до 1860-х гг.)²³.

Угольная промышленность России в XIX в. тесно связана с ростом промышленного потенциала страны и расширением сети железных дорог, что способствовало неуклонному росту добычи. К 1900 г. значительно выросло применение паровых машин (табл. 1.4). Кроме того, на шахтах Донбасса работало несколько десятков врубовых машин зарубежного производства. Однако уровень механизации угледобычи в России был существенно ниже, чем в зарубежных странах. Так, доля механизированной подрубки угля в 1914 г. составляла в России 1,7%, в США — 50,7%, в Бельгии — 10%, в Англии — 8,5%²⁴. Почти все процессы на шахтах дореволюционной России выполнялись вручную: основными орудиями производства были кайло, обушок, лопата, санки. Низкий уровень механизации сказывался на производительности труда: годовая выработка на одного шахтера Донбасса составляла 153 т/год (12,8 т/месяц), в Англии — 264 т/год, во Франции — 203 т/год.

Таблица 1.4. Использование паровых машин в каменноугольной промышленности по годам в России²⁵

	1885 г.	1890 г.	1895 г.	1900 г.
Количество паровых машин	322	442	626	1526
Мощность, л. с.	12 637	17 223	28 979	64 152

В результате в 1913 г. Россия добывала всего 29,2 млн т угля — в 18 раз меньше, чем США, в 10 раз меньше, чем Германия и Великобритания. В результате перед 1914 г. импорт угля покрывал 15% потребностей страны. К 1916 г. объем добычи составил 34,6 млн т, при этом 80% производства приходилось на Донбасс.

Отечественная угольная промышленность составляла всего 2,5% мировой добычи²⁶.

²³ Угольная промышленность // Горная энциклопедия [сайт]. — URL: <http://www.mining-enc.ru/u/ugolnaya-promyshlennost> (дата обращения: 04.01.2019).

²⁴ Грунь В. Д. История угледобычи в России.

²⁵ Там же.

²⁶ Введение в специальность. Основы экономики топливно-энергетического комплекса : учеб. пособие.

После гражданской войны 1918–1920 гг. 70% шахт оказались разрушенными, непригодными для эксплуатации, сложилось тяжелое положение с топливом. Разработанный в 1920 г. план ГОЭЛРО предусматривал увеличение за 10–15 лет объема добычи угля до 62,5 млн т. Добыча каменного угля превзошла уровень 1913 г. к 1929 г.²⁷

К концу 1-й пятилетки (1932 г.) добыча угля достигла 64,4 млн т, строились новые шахты: было построено 138 шахт в Восточной Сибири, на Дальнем Востоке, в Средней Азии, активно строились новые шахты в Подмосковном бассейне²⁸. В этот период были освоены новые угольные бассейны и месторождения: Карагандинский в Казахстане, Райчихинское на Дальнем Востоке, Ткварчели в Закавказье, Букачачинское в Восточной Сибири и др.

К 1937 г. уровень механизации качественно повысился: механизация зарубки достигла 87%, доставки — 85%, откатки — 48%. В течение 1929–1940 гг. было построено 285 шахт общей годовой производственной мощностью более 100 млн т²⁹. В период 1930–1940 гг. производительность труда выросла в два раза (с 15,9 до 30,6 т/месяц), что было связано как с механизацией, так и с интенсификацией и реорганизацией труда в рамках «стахановского движения». Параллельно проводилась электрификация шахтного оборудования (насосного, вентиляционного, транспортного). Появились широкозахватные комбайны, которые стали основной угледобывающей техникой во всех угольных бассейнах страны (табл. 1.5). Внедрение комбайнов позволило в три раза повысить уровень самого трудоемкого процесса в очистных забоях — навалки угля.

Механизация угледобычи стала возможна благодаря развитию отечественного угольного машиностроения — появились заводы в Горловке, Ленинграде, Конотопе, Харькове, Томске и других городах.

Таблица 1.5. Доля механизированной навалки угля (% к общему объему добычи угля в очистных забоях)³⁰

Бассейн	1951 г.	1955 г.	1960 г.	1965 г.
Донецкий	23,1	37,5	47,8	58,1
Кузнецкий	35,2	50,2	54,9	61,3
Карагандинский	26,1	62,1	73,6	84,5
Печерский	9,8	44,8	67,5	89,3
Подмосковный	1,2	4,0	41,9	48,0
Всего по отрасли	16,3	33,1	48,8	67,5

В военные годы основные бассейны Европейской части СССР оказались на оккупированной территории, что потребовало активного строительства новой промышленной базы на востоке страны: были построены десятки шахт в Кузбассе; новые разрезы для добычи угля открытым способом в Казахстане и Красноярском крае; начато освоение Печорского бассейна. Широкое распространение получил открытый способ добычи угля, позволяющий быстро наращивать объемы производства: если в 1940 г. на добычу открытым способом приходилось около 4% от всего объема добычи, то к 1950 г. его доля увеличилась до 10,4%, а к 1965 г. — до 24,3%³¹. Совершенствование экскаваторного оборудования способствовало как росту производительности труда, так и увеличению глубины разрезов до 100–150 м.

²⁷ Угольная промышленность // Горная энциклопедия [сайт]. — URL: <http://www.mining-enc.ru/u/ugolnaya-promyshlennost> (дата обращения: 04.01.2019).

²⁸ Введение в специальность. Основы экономики топливно-энергетического комплекса : учеб. пособие.

²⁹ Грунь В. Д. История угледобычи в России.

³⁰ Там же.

³¹ Там же.

В послевоенные годы наряду с восстановлением шахт, разрушенных в годы войны, ускоренными темпами создавались предприятия угольной отрасли в новых и уже освоенных бассейнах. К 1965 г. угледобыча в СССР выросла более чем в 3 раза по сравнению с довоенным уровнем 1940 г. и составила 577,7 млн т. Росту добычи способствовал активный рост производительности труда в послевоенное время (табл. 1.6).

Развитие комбайновой выемки ускорило замену деревянных крепей на металлические. Они широко стали внедряться в 1947 г., когда началось производство податливых забойных стоек трения с клиновым замком. К 1951 г. на пологих и наклонных пластах металлическими крепями было закреплено 17% всех лав, а в 1965 г. — 47%. Активно развивались погрузочные машины, к 1965 г. уровень механизации погрузки угля и породы составил 67%, что сократило трудоемкость проведения выработок на 30–50% по сравнению с погрузкой вручную и способствовало росту производительности труда³².

Таблица 1.6. Производительность труда рабочего по добыче угля, т/месяц³³

Год	На шахтах	На разрезах	Всего
1950	27,8	96,3	30,1
1955	32,5	174,7	37,8
1960	35,0	213,7	41,9
1970	45,6	306,4	58,5
1980	46,1	441,5	69,1
1990	38,7	398,1	65,5
1991	30,7	369,7	56,8

В 1960-х гг. начался массовый переход от комбайновой технологии к механизированным комплексам, включающим в себя узкозахватные комбайны или струги, забойные скребковые конвейеры и гидрофицированные передвижные крепи, состоящие из линейных секций, распределительной и контрольно-регулирующей гидроаппаратуры и гидрокоммуникаций. Такие комплексы сохраняют свою целостность при передвижении по всей длине лавы и от забоя к забою по мере выемки угля вслед за комбайном, что значительно упрощает проведение подготовительных работ в горных выработках. Внедрение очистных механизированных комплексов позволило повысить производительность труда в отрасли в 1,6 раза.

Важным достижением в области технологии явились разработка методов обогащения угля и создание новой отрасли по переработке угля.

В топливно-энергетическом балансе России доля угля в 1950-е гг. достигала 65%, а в 1960-х гг. стала снижаться до 40–50%. В 1970–1980-е гг. угольное топливо еще активнее вытеснялось нефтегазовым.

Распад СССР привел к тому, что значительная часть ранее созданной угольной базы оказалась на Украине и в Казахстане. На долю России в 1990 г. приходилось 55,7%, Украины — 23,7%, Казахстана — 18,8% общесоюзной добычи угля. Россия получила 271 из 574 угледобывающих предприятий бывшего СССР. В Европейской части страны их осталось 82 из 333. Почти полностью была утеряна мощная база высококачественных углей Донбасса и Караганды, отошел к Казахстану уникальный по мировым меркам Экибастузский угольный бассейн. Россия также лишилась многих заводов горного машиностроения.

³² Грунь В. Д. История угледобычи в России.

³³ Там же.

Помимо этого, в ходе реструктуризации и осуществления новой политики в период 1993–2004 гг. было закрыто 202 особо убыточных предприятия, в результате чего были ликвидированы производственные мощности по добыче угля, составившие около 90 млн т, а частичное выбытие мощностей составило 122 млн т³⁴. Ввода мощностей в 1994–1999 гг. практически не происходило. Рост вводимых мощностей начался с 2000 г. За период 2000–2006 гг. он составил 154 млн т. В тот же период возобновился рост добычи. В 2018 г. объем добычи превысил советский уровень (рис. 1.3).

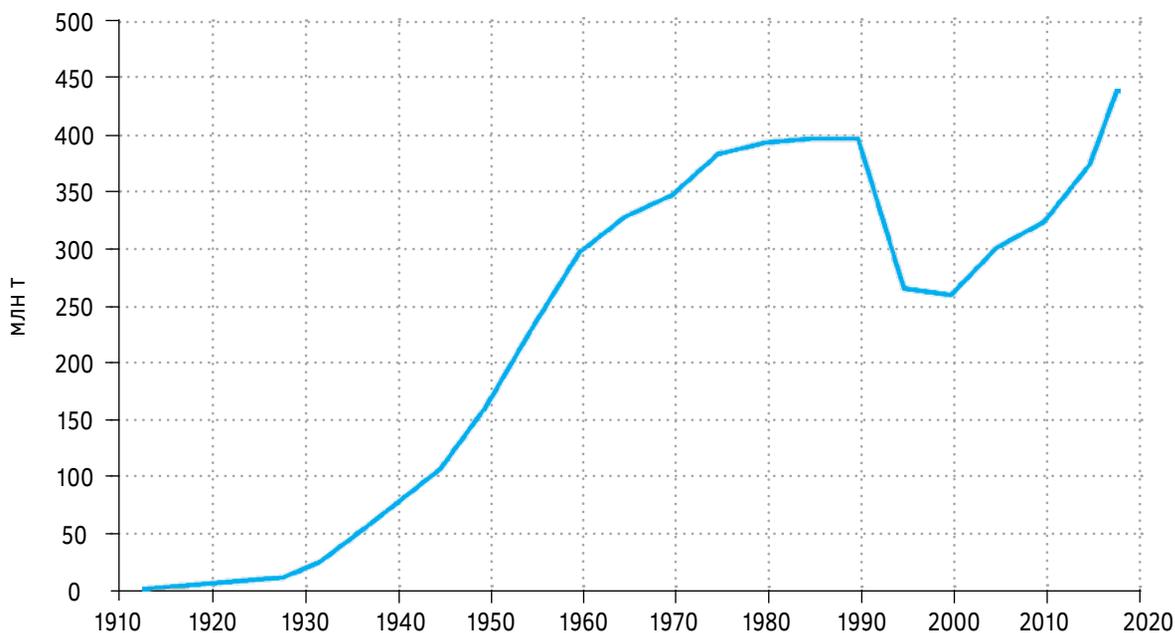


Рис. 1.3. Динамика добычи угля в России³⁵

ЦИКЛЫ РАЗВИТИЯ УГЛЕДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

С развитием угледобывающей отрасли закономерно изменялись применяемые технологии добычи, условия труда, структура себестоимости добычи, рентабельность добычи и использования угля. Историю развития угледобычи можно условно разделить на цикл зарождения, характеризующийся локальными случаями добычи и использования угля, и промышленный период развития угольной отрасли.

Цикл зарождения угледобывающей отрасли характеризуется примитивной ручной добычей в мелких горных выработках (искусственная полость, сделанная в недрах земли или на поверхности) с неизменно низкой производительностью труда. При этом уголь использовался в качестве топлива во многих странах и регионах: в Древнем Китае, античной Греции,

³⁴ Чернова В. Э. Актуальность энергосбережения. Государственная политика в области повышения эффективности использования энергии : учеб. пособие. — СПб., 2014. — URL: <http://www.nizrp.narod.ru/metod/kaffiniuch/5.pdf> (дата обращения: 04.10.2019).

³⁵ http://istmat.info/files/uploads/17850/narhoz_rsfsr_1958_g_promyshlennost.pdf;
<http://istmat.info/node/17051>;
http://istmat.info/files/uploads/18147/narhoz_rsfsr_1956_promyshlennost.pdf;
http://istmat.info/files/uploads/17062/narhoz_rsfsr_70_let_mat._proizvodstvo.pdf;
http://istmat.info/files/uploads/20469/narhoz_1965_toplivo.pdf;
http://istmat.info/files/uploads/15622/narodnoe_hozyaystvo_rsfsr_v_1975_g.pdf.

средневековой Европе. В конце допромышленного периода формируется новое неэнергетическое направление в использовании продукта — коксование. Ю. Петерсон в 1589 г. получил кокс из каменного угля, применяемый впоследствии при выплавке металлов, а А. Дерби в 1709 г. впервые выплавил железо с помощью кокса, полученного из каменного угля, вместо применявшегося древесного угля³⁶.

Дальнейшее развитие угольной отрасли происходило благодаря постоянно растущему спросу на топливные ресурсы и кокс, обусловленному технологическим прогрессом и развитием промышленности. По этой причине технологические циклы становления угледобывающей отрасли можно соотнести с основными циклами развития мировой промышленности (табл. 1.7).

Таблица 1.7. Характеристика технологических циклов развития угледобывающей промышленности³⁷

Период, годы	Цикл	Вид топлива	Основные направления использования	Технологические лидеры
1740–1830	Первый (ранняя промышленная добыча угля)	Древесный уголь	Текстильная промышленность, текстильное машиностроение, выплавка чугуна, обработка железа	Великобритания, Франция
1830–1880	Второй (начало технического развития)	Каменный уголь	Паровой двигатель, железнодорожное строительство, транспорт, машиностроение, паростроение, угольная промышленность, станкоинструментальная промышленность, черная металлургия	Великобритания, Франция, Германия, США
1880–1930	Третий (начало механизации добычи)	Каменный уголь, нефть, гидроэнергия	Электротехническое, тяжелое машиностроение, производство и прокат стали, электроэнергетика, неорганическая химия	Германия, США, Великобритания, Франция, Нидерланды
1930–1980	Четвертый (совершенствование технологий добычи)	Нефть, уголь, газ, гидроэнергия, атомная энергия	Автомобилестроение, цветная металлургия, органическая химия, производство и переработка нефти	США, страны Западной Европы, СССР, Канада, Австралия, Япония
1980–1990	Пятый (повышение качества угля и КПД его сжигания)	Нефть, уголь, газ, гидроэнергия, возобновляемые источники энергии	Электронная промышленность, телекоммуникации, роботостроение, производство и переработка газа, информационные услуги	США, ЕС, Япония

³⁶ Губанов В. А. Этапы развития угольной промышленности: технико-технологический аспект. — URL: <http://izdatelstvo.bgu.ru/epm/dl.ashx?id=1396> (дата обращения: 04.01.2019).

³⁷ Глазьев С. Ю. О стратегии развития экономики России : науч. докл. / под ред. С. Ю. Глазьева. — М. : ООП РАН, 2011. — 48 с. — Препринт. — URL: http://russian-greens.ru/docs/dokl_new_economic_strategy.pdf (дата обращения: 04.01.2019).

Таблица 1.8. Основные этапы циклов развития угледобывающей промышленности

Цикл	Научно-технический этап	Технико-экономический этап	Экономическо-социальный этап	Социально-регуляторный этап
Первый (ранняя промышленная добыча угля)	Появление механических и осветительных приспособлений для добычи угля	Увеличение объемов и производительности добычи угля	Замещение древесного топлива каменным углем для отопления	Рост численности шахтеров при сохранении тяжелых условий труда
Второй (начало технического развития)	Применение паровых двигателей в угольной промышленности	Увеличение объемов и производительности добычи угля	Рост потребления угля в паровых машинах и металлургии, активное развитие промышленности	Рост численности шахтеров при сохранении тяжелых условий труда
Третий (начало механизации добычи)	Внедрение драглайнов, конвейеров, применение буровзрывной выемки с механизированной зарубкой	Увеличение объемов и производительности добычи угля, развитие открытой добычи	Рост потребления угля в электроэнергетике	Рост численности и квалификации работников, улучшение условий труда
Четвертый (совершенствование технологий добычи)	Применение узкозахватной выемки комбайнами и стругами с индивидуальной металлической крепью	Увеличение объемов и производительности добычи угля, развитие обогащения	Рост конкуренции на рынке энергоресурсов под влиянием роста доступности иных видов топлива	Рост квалификации работников, улучшение условий труда
Пятый (повышение качества угля и КПД его сжигания)	Повышение автоматизации технологии добычи угля, повышение эффективности сжигания угля	Увеличение производительности добычи угля при стабилизации объемов добычи	Стабилизация потребления угля под влиянием ужесточения природоохранного законодательства, отказ от неэкологических технологий	Сокращение численности работников, переход работников на удаленное управление процессом добычи

Первый технологический цикл

Промышленный период развития угольной отрасли начинается с появления первых механических приспособлений для облегчения ручного труда. Однако их уровень оставлял низкими темпы роста производительности труда, и ручной труд продолжал преобладать над машинным.

Появляются первые изменения в технологии процесса добычи угля: например, в 1761 г. был выдан патент на механическое приспособление для подрубки угольного пласта. Появляются основные операции обогащения: дробление, ручная сортировка, измельчение³⁸. В 1815 г. изобретена рудничная лампа, конструкция которой не позволяла при воспламенении горючей газовой смеси, попадающей внутрь лампы, распространяться пламени наружу, в противном случае это привело бы к внешнему взрыву газовой смеси, что снизило количество аварий в шахтах.

В этот период на фоне снижения запасов древесины расширяется использование каменного угля для отопления жилых домов, в особенности в Англии.

³⁸ Губанов В. А. Этапы развития угольной промышленности: технико-технологический аспект. — URL: <http://izdatelstvo.bgu.ru/epm/dl.ashx?id=1396> (дата обращения: 04.01.2019).

Второй технологический цикл

Массовое использование паровых двигателей на фабриках послужило основой промышленного развития. Каменный уголь стал основным энергоносителем не только в Англии, но и во всей Европе³⁹.

К этому периоду относится и распространение технологических процессов металлургии, использующих уголь: коксования и пудлингования (способ переплавки чугуна на железо на каменном угле, изобретенный в 1880-х гг. английским металлургом Кортон). В то же время развитие легкой промышленности потребовало изготовления оборудования, что создало дополнительный спрос на металлопродукцию.

Расширение использования угля в паровых двигателях и металлургии стало одним из важнейших аспектов промышленной революции. Создание крупных машинных производств и развитие рыночных отношений потребовали решения транспортных проблем, в связи с чем активно развивали железнодорожный транспорт (который, в свою очередь, также стал крупным потребителем угля).

В течение XIX в. разрабатывались технологии для повышения производительности труда в угольной промышленности. В 1835 г. в США был выдан патент основной машины для открытого способа разработки — одноковшового парового экскаватора на рельсовом ходу, в 1852 г. в Англии — патент на дисковую врубовую машину для угольных шахт. В 1860 г. французский инженер М. Кувре изобретает многоковшовый экскаватор, а в 1864 г. в Великобритании изготовлена первая цепная (баровая) врубовая машина; в Германии в 1876 г. изобретен гидравлический станок вращательного бурения⁴⁰.

Третий технологический цикл

Третий цикл характеризуется развитием электроэнергетики. Впервые уголь для выработки электроэнергии был использован в 1880 г.⁴¹

Увеличение спроса на уголь стимулирует развитие угольных технологий. В США создан первый в мире драглайн для открытых горных работ. В 1902–1906 гг. в угольных шахтах Англии появляются скребковые и ленточные конвейеры, а в Германии — качающиеся конвейеры для транспортировки добытого угля⁴².

Для сокращения затрат начинает широко применяться буровзрывная выемка с механизированной зарубкой (1930–1940 гг.).

Четвертый технологический цикл

Четвертый цикл характеризуется качественным и количественным развитием энергетики. Активно строятся ГЭС, АЭС, ТЭС на углеводородном топливе, что способствует постепенному сокращению доли угля в топливно-энергетическом балансе развитых стран. Технологическое развитие угольной промышленности в течение данного цикла было направлено на совершенствование технологий добычи. В частности, были внедрены узкозахватная выемка комбайнами и стругами с индивидуальной металлической крепью (1955–1970 гг.) и комплексно-механизированная выемка комбайнами и стругами с гидрофицированной металлической крепью (1961–1980 гг.)⁴³.

³⁹ Игошев Б. М. История технических инноваций : учеб. пособие для школьников. — Екатеринбург, 2012.

⁴⁰ Губанов В. А. Этапы развития угольной промышленности: технико-технологический аспект. — URL: <http://izdatelstvo.bgu.ru/epm/dl.ashx?id=1396> (дата обращения: 04.01.2019).

⁴¹ Там же.

⁴² Там же.

⁴³ Там же.

Пятый технологический цикл

Стремительный рост энергопотребления и возрастающее внимание к проблемам экологии привели к необходимости энергосбережения и постепенной переориентации отдельных стран на источники энергии, оказывающие наименьшее воздействие на окружающую среду. Это приводит к постепенному отказу отдельных стран от угольного топлива в пользу более экологичных источников энергии. Дальнейшее использование угля зависит от мировой климатической политики и развития технологий.

Данный технологический цикл, который продолжается по настоящее время, направлен на сокращение выбросов и повышение КПД угольных станций за счет процессов обогащения угольного топлива и совершенствования технологий сжигания (например, в циркулирующем кипящем слое, на сверхкритических и суперсверхкритических параметрах пара). Развитие автоматизированных систем управления повышает степень автоматизации процесса угледобычи.

Эволюция технологий добычи угля

Стоит отметить, что каждый цикл обусловлен определенным этапом, который дает новый толчок к развитию технологий. Последовательное прохождение всех этапов приводит к завершению цикла развития отрасли, после чего цикл повторяется (рис. 1.4).

Ресурсоэффективность в рамках исторического развития отраслей промышленности рассматривается как важнейший фундаментальный концепт перехода технологического развития на новый уровень. При этом метод исследования сосредоточен на изучении реакции отрасли как целого на изменяющиеся условия, без подробного описания механизма работы и внутреннего устройства той или иной технологии, так как в рамках поставленной задачи это не является первостепенным объектом изучения.

ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ УГЛЕДОБЫЧИ

В настоящее время добыча угля осуществляется подземным (шахтным) или открытым (на карьерах) способом, в зависимости от глубины залегания породы (в отдельных случаях возможна комбинированная разработка месторождений).

Добыча подземным способом

Схема технологического процесса добычи угля подземным способом с использованием в забое самотечно-напорного гидротранспорта приведена на рис. 1.5, основные этапы добычи угля подземным способом — в табл. 1.9.

Основными технологическими этапами добычи угля подземным способом являются проведение горных выработок и разрушение горной породы, подъемно-транспортные работы, транспортировка и складирование угля.

При проведении горных выработок различают основные и вспомогательные процессы:

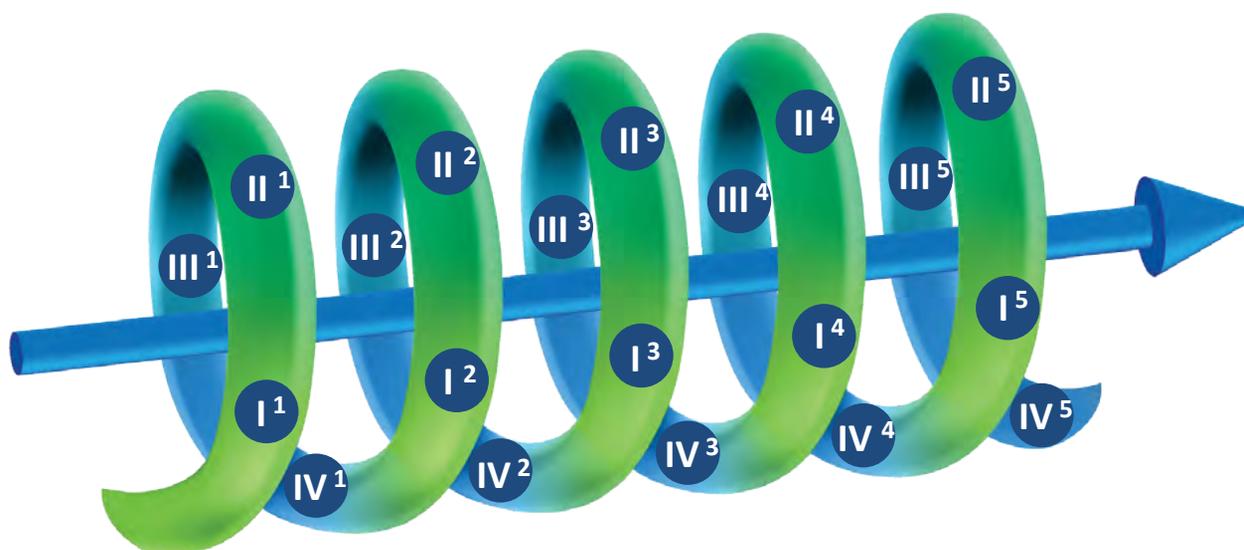
- основные — проведение и крепление выработки;
- вспомогательные — возведение временной крепи, навеска вентиляционных труб, наращивание конвейера или настилка рельсовых путей, прокладка труб, кабелей и др.

Классификация технологических схем проведения горных выработок

В зависимости от однородности пересекаемых пород проведение выработок делится на:

- выработки в однородных породах (в случае, если забой выработки пересекает только один вид пород);
- выработки в неоднородных породах (в случае, если забой выработки пересекают два и более вида пород).

Проведение выработки по однородной породе осуществляется сплошным забоем (уголь и вмещающая порода вынимаются одновременно) при мощности пласта до 0,6 м или при большей мощности пласта, но при низком качестве угля.



- | | |
|--|--|
| <p>I¹ — появление механических и осветительных приспособлений для добычи угля</p> <p>II¹ — увеличение объемов и производительности добычи угля</p> <p>III¹ — замещение древесного топлива каменным углем для отопления</p> <p>IV¹ — рост численности шахтеров при сохранении тяжелых условий труда</p> <p>I² — применение паровых двигателей в угольной промышленности</p> <p>II² — увеличение объемов и производительности добычи угля</p> <p>III² — рост потребления угля в паровых машинах и металлургии, активное развитие промышленности</p> <p>IV² — рост численности шахтеров при сохранении тяжелых условий труда</p> <p>I³ — внедрение драглайнов, конвейеров, применение буровзрывной выемки с механизированной зарубкой</p> <p>II³ — увеличение объемов и производительности добычи угля, развитие открытой добычи</p> <p>III³ — рост потребления угля в электроэнергетике</p> <p>IV³ — рост численности и квалификации работников, улучшение условий труда</p> | <p>I⁴ — применение узкозахватной выемки комбайнами и стругами с индивидуальной металлической крепью</p> <p>II⁴ — увеличение объемов и производительности добычи угля, развитие обогащения</p> <p>III⁴ — рост конкуренции на рынке энергоресурсов под влиянием роста доступности иных видов топлива</p> <p>IV⁴ — рост квалификации работников, улучшение условий труда</p> <p>I⁵ — повышение автоматизации технологии добычи угля, повышение эффективности сжигания угля</p> <p>II⁵ — увеличение производительности добычи угля при стабилизации объемов добычи</p> <p>III⁵ — стабилизация потребления угля под влиянием ужесточения природоохранного законодательства, отказ от неэкологических технологий</p> <p>IV⁵ — сокращение численности работников, переход на удаленное управление процессами добычи</p> |
|--|--|

Рис. 1.4. Эволюция технологий добычи угля

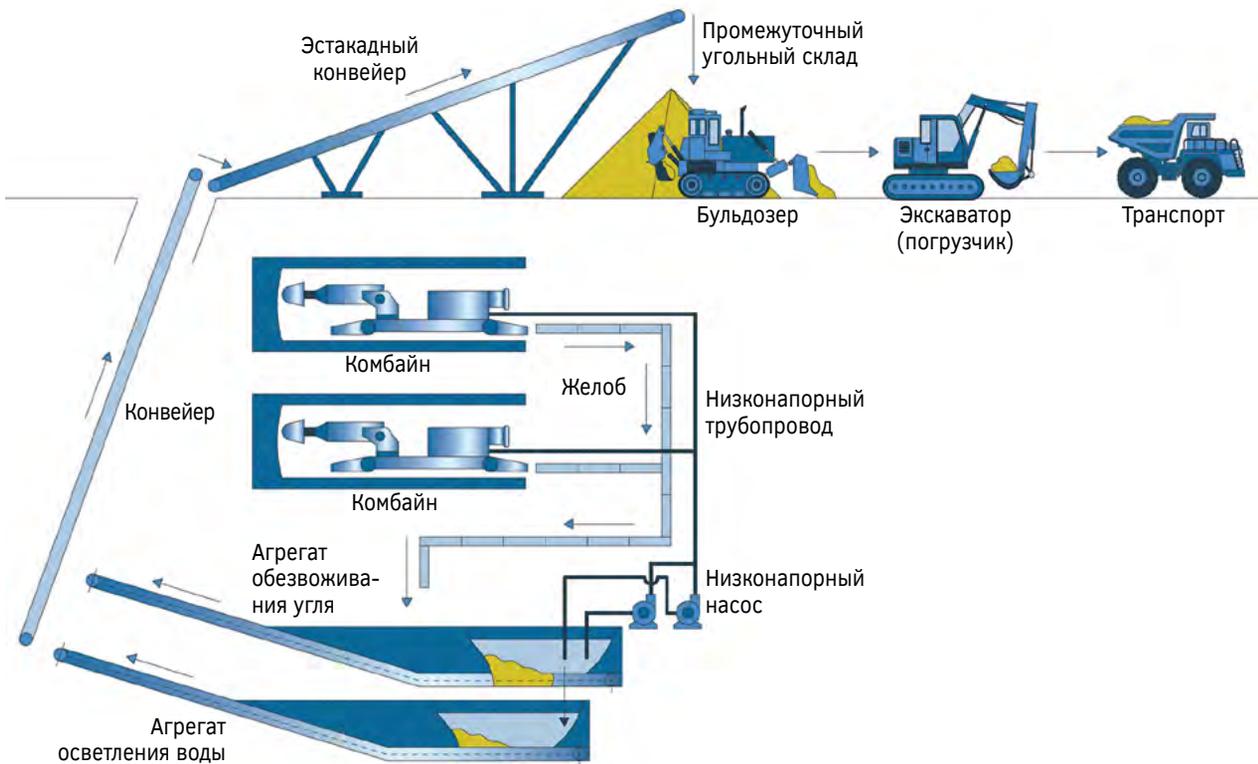


Рис. 1.5. Схема технологического процесса добычи угля подземным способом с использованием в забое самотечно-напорного гидротранспорта⁴⁴

При неоднородных породах выработка проводится как сплошным забоем, так и уступным забоем, т. е. с отдельной выемкой угля и породы. При этом вначале проводят выемку угольного пласта на некоторую величину, а затем — вмещающих пород.

В зависимости от места размещения породы проведение выработок подразделяется по способам:

- узким забоем;
- широким забоем.

При проведении выработок узким забоем уголь вынимается только в пределах поперечного сечения выработки, а порода, полученная от подрывки, выдается на поверхность шахты.

При проведении выработок широким забоем уголь вынимается на ширину, превышающую изначальную ширину выработки. В образовавшемся пространстве (раскоске) размещаются породы от подрывки.

В зависимости от способа отделения горных пород от угольного массива выделяют следующие технологии работ:

- работы с помощью проходческих комбайнов применяются по углям и породам средней крепости (коэффициент крепости $f = 5-6$);
- буровзрывные работы применяются в породах любой крепости;
- ручные работы с использованием отбойного молотка применяются в особых случаях (проведение водосточной канавки, на крутом падении пласта);
- комбинированные работы представляют собой комбинацию различных применяемых технологий⁴⁵.

⁴⁴ ИТС 37–2017. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Добыча и обогащение угля. — М. : Бюро НДТ, 2017.

⁴⁵ Васючков Ю. Ф. Горное дело : учеб. для учащихся горн. техникумов. — М. : Недра, 1990. — С. 58–61.

Таблица 1.9. Основные этапы добычи угля подземным способом⁴⁶

№	Этап процесса (подпроцесс)	Основное технологическое оборудование
1	Проведение горных выработок и разрушение горной породы	Проходческие комбайны, буровые установки, насосные установки, зарядные машины, вентиляционные трубы, источники электроэнергии
1.1	Проведение горных выработок с разрушением пород путем взрыва	Проходческие комбайны, буровые установки, зарядные машины, системы детонации, крепи механизированные, насосные установки, вентиляционные трубы, источники электроэнергии
1.2	Проведение горных выработок с применением проходческих комбайнов	Проходческие комбайны, насосные установки, вентиляционные трубы, источники электроэнергии
1.3	Крепление горных выработок	Проходческие комбайны, крепи механизированные
2	Подъемно-транспортные работы	Ленточные и скребковые конвейеры, выемочные машины, скипы, подлавные (скребковые) перегружатели, дробилки, насосные станции, источники электроэнергии
2.1	Очистные работы	Выемочные машины, лавные скребковые конвейеры, подлавные (скребковые) перегружатели, дробилки, насосные станции, источники электроэнергии
2.2	Транспортировка горной массы в забое	Конвейеры (ленточные и скребковые), перегружатели (конвейерные, скребковые), источники электроэнергии
2.3	Транспортировка горной массы на поверхность	Скиповой подъемник, конвейеры (ленточные, скребковые), источники электроэнергии
3	Транспортировка горной массы на поверхности	Конвейеры (ленточные и скребковые), питатели, железнодорожные вагоны, локомотивы, погрузчики, источники электроэнергии
4	Складирование угля и отходов производства	Погрузчики, бульдозеры, скреперы, экскаваторы (в том числе драглайны)
5	Вентиляция и дегазация	Вентиляторы главного проветривания, передвижные дегазационные установки с водокольцевыми насосами, модульные дегазационные установки
6	Осушение, водоотлив, водоотведение и водоснабжение	Насосные установки, водосборники, установки главного водоотлива, трубопроводы
7	Природоохранные технологии	Стационарные оросительные, распылительные, оросительно-вентиляционные установки, поливооросительные машины, пылеулавливающие установки, пруды-отстойники, установки для хлорирования воды, биоокислительные каналы, нефтеловушки, отвалообразователи непрерывного действия, осветлители, фильтры, флотационные установки, фильтр-прессы, установки обеззараживания
7.1	Предотвращение загрязнения атмосферного воздуха	Оросительные установки, пылеулавливающие установки
7.2	Очистка сточных вод	Пруды-отстойники, установки для хлорирования воды, биоокислительные каналы, нефтеловушки
7.3	Утилизация отходов производства	Отвалообразователи, автосамосвалы, бульдозеры, погрузчики, конвейеры

⁴⁶ ИТС 37–2017. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Добыча и обогащение угля.

При добыче угля подземным способом требуются материальные ресурсы (вода) и энергоресурсы (электроэнергия, нефтепродукты и т. д.). В зависимости от технологии производства и используемого оборудования различаются удельные показатели потребления материальных и энергетических ресурсов.

Таблица 1.10. Расход сырья, материалов и энергоресурсов при добыче угля подземным способом⁴⁷

Наименование	Единицы измерений	Расход на 1 т продукции	
		минимальный	максимальный
Электроэнергия	кВт·ч/т	15,6	191,2
Свежая вода	м ³ /т	0,07	0,7
Топливо	т. у.т./т	0,0001	0,01

Добыча открытым способом

На рис. 1.6 представлена общая схема технологического процесса при добыче угля открытым способом, основные этапы добычи угля открытым способом — в табл. 1.11.

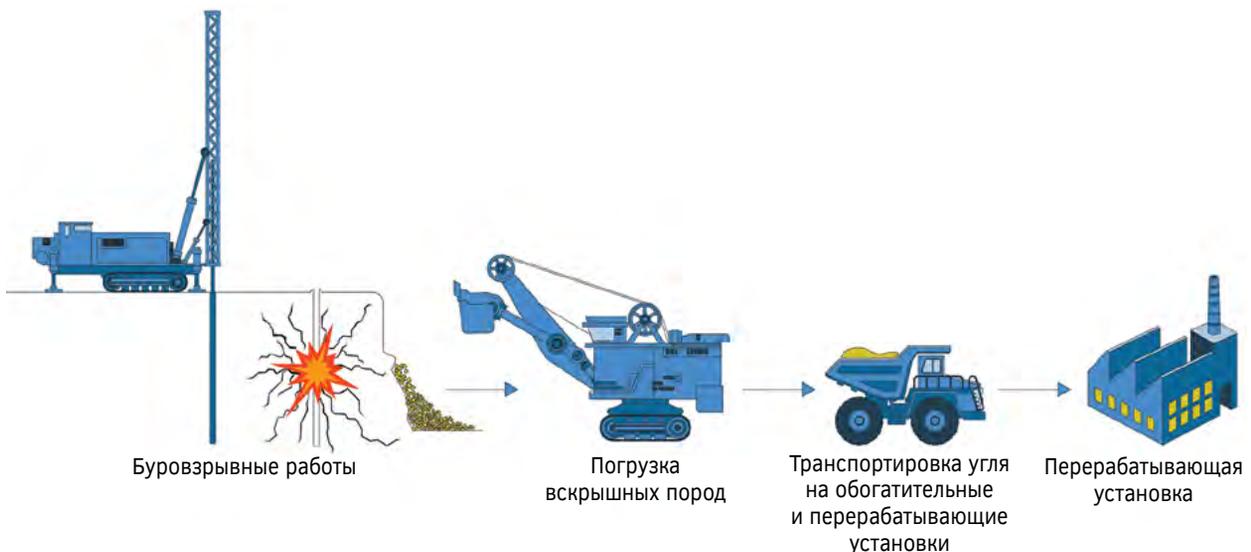


Рис. 1.6. Схема технологического процесса добычи угля открытым способом⁴⁸

При подготовке угля к выемке из крепких (например, скальных) пород применяются буровзрывные работы, при подготовке к выемке из полускальных пород может применяться механическое рыхление, а при выемке из мягких пород — гидравлическое разрушение.

Выемочно-погрузочные работы представляют собой отделение от массива мягкой или предварительно разрыхленной крепкой породы с последующей погрузкой в транспортные средства или непосредственно в отвал. Основным средством для проведения выемочно-погрузочных работ являются экскаваторы, иногда применяется и другая техника (скреперы, бульдозеры, погрузчики и т. д.).

⁴⁷ Там же.

⁴⁸ Там же.

Экскаваторы могут быть одноковшовыми и многоковшовыми. Одноковшовые экскаваторы характеризуются циклическим действием — они последовательно выполняют операции копания и перемещения горной массы в ковше, поворачиваясь вокруг своей оси. Многоковшовые экскаваторы характеризуются непрерывным действием — они производят выемку и погрузку горной массы в процессе перемещения ковшей по круговой траектории.

Таблица 1.11. Основные этапы добычи угля открытым способом⁴⁹

№	Этап процесса (подпроцесс)	Основное технологическое оборудование
1	Подготовка горных пород к выемке	Бульдозеры, буровые станки, вакуумные машины, передвижные насосные установки, смесительно-зарядные машины, забоечные машины, системы детонации, навесные рыхлители на тракторном шасси, бульдозерно-рыхлительные агрегаты, гидромониторы, кабелепередвижник
1.1	Буровзрывные работы	Бульдозеры, буровые станки, вакуумные машины, передвижные насосные установки, смесительно-зарядные машины, забоечные машины, системы детонации, кабелепередвижник
1.2	Механическое рыхление	Навесные рыхлители на тракторном шасси, бульдозерно-рыхлительные агрегаты
1.3	Гидравлическое разрушение	Гидромониторы
2	Выемочно-погрузочные работы (экскавация)	Экскаваторы (одноковшовые и многоковшовые), погрузчики, бульдозеры, скреперы и землеройно-транспортные машины
2.1	Экскавация одноковшовыми экскаваторами	Одноковшовые экскаваторы
2.2	Экскавация многоковшовыми экскаваторами	Многоковшовые экскаваторы (роторные и цепные)
2.3	Экскавация прочими видами техники	Погрузчики, бульдозеры, скреперы и землеройно-транспортные машины
3	Транспортировка горной массы (перемещение карьерных грузов)	Карьерные самосвалы, грейдеры, скреперы, щебневыбрасывающие машины, бульдозеры, локомотивы, полувагоны, шпалоподблочные и ремонтные машины, краны на железнодорожном ходу, конвейеры, скипы, канатные дороги, кабелепередвижник
3.1	Перевозка карьерными самосвалами	Карьерные самосвалы, грейдеры, скреперы, щебневыбрасывающие машины, бульдозеры
3.2	Перевозка железнодорожным транспортом	Локомотивы (тепловозы, реже — электровозы), полувагоны, бульдозеры, шпалоподблочные и ремонтные машины, краны на железнодорожном ходу, кабелепередвижник, толкатель, устройство маневровое
3.3	Транспортировка конвейером	Конвейеры, кабелепередвижник
3.4	Транспортировка прочими видами транспорта	Скипы, канатные дороги, кабелепередвижник
4	Складирование и отгрузка угля	Погрузчики, экскаваторы, погрузочные комплексы, машины для обдувки вагонов от снега и обработки вагонов от примерзания
4.1	Складирование угля на штабелях	Погрузчики, бульдозеры
4.2	Отгрузка угля потребителям	Погрузчики, экскаваторы, погрузочные комплексы, машины для обдувки вагонов от снега и обработки вагонов от примерзания

⁴⁹ ИТС 37–2017. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Добыча и обогащение угля.

№	Этап процесса (подпроцесс)	Основное технологическое оборудование
5	Осушение, водоотлив, водоотведение и водоснабжение	Устройства для регулирования внутрикарьерного стока, водосборники, насосные установки, трубопроводы, кабелепередвижник
6	Природоохранные технологии	Стационарные оросительные, распылительные, оросительно-вентиляционные установки, поливооросительные машины, пылеулавливающие установки, пруды-отстойники, установки для хлорирования воды, биоокислительные каналы, нефтеловушки, отвалообразователи непрерывного действия, кабелепередвижник
6.1	Предотвращение загрязнения атмосферного воздуха	Стационарные оросительные, распылительные, оросительно-вентиляционные установки, поливооросительные машины, пылеулавливающие установки, кабелепередвижник
6.2	Очистка сточных вод	Пруды-отстойники, установки для хлорирования воды, биоокислительные каналы, нефтеловушки, кабелепередвижники
6.3	Утилизация отходов производства	Отвалообразователи, автосамосвалы, бульдозеры, погрузчики, конвейеры, кабелепередвижник

Экскаваторные забои могут быть торцовыми (используются для одноковшовых и роторных экскаваторов), фронтальными (используются для цепных экскаваторов на рельсовом ходу и фронтальных погрузчиков) и тупиковыми (для проходки траншей).

По взаимному расположению экскаватора и транспортного средства выемка может быть организована следующими способами: верхним черпанием и верхней погрузкой, нижним черпанием и нижней погрузкой, смешанным черпанием и погрузкой. По характеру движения транспортных средств под погрузку различают две схемы движения: тупиковую и сквозную.

Для экскаваторов с механической лопатой максимальная производительность достигается при работе в торцевых забоях, поскольку в таких случаях угол поворота стрелы составляет до 90°, и возможно организовать сквозную схему движения транспорта. При работе экскаваторов с механической лопатой в тупиковом забое необходимо увеличить угол поворота стрелы, а самосвалы вынуждены двигаться по тупиковой схеме. При работе экскаваторов с механической лопатой во фронтальном тупиковом забое также высок угол поворота стрелы, а сами экскаваторы вынуждены часто перемещаться.

При добыче угля открытым способом широко используются материальные ресурсы (вода) и энергоресурсы (электроэнергия, нефтепродукты и т. д.). Расход материалов и энергоресурсов на тонну товарного угля и, как следствие, количество выбросов, сбросов и образующихся отходов зависят от принятой технологии производства и от горно-геологических условий месторождения. В связи с этим удельные расходные показатели по материалам и энергоресурсам (на тонну угля) различаются в несколько раз (табл. 1.12).

Таблица 1.12. Расход сырья, материалов и энергоресурсов при добыче угля открытым способом⁵⁰

Наименование	Единицы измерений	Расход на 1 т продукции	
		минимальный	максимальный
Электроэнергия	кВт·ч/т	0,4	28,4
Свежая вода	м ³ /т	0,005	0,06
Топливо	т. у.т./т	0,0002	0,005

⁵⁰ ИТС 37–2017. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Добыча и обогащение угля.

Обогащение угля

Важным показателем, определяющим приоритетную схему обогащения угля (рис. 1.7), является его обогатимость, которая характеризует способность добытого угля к разделению на продукты различного качества. Показатель обогатимости рассчитывают как отношение выхода фракций промежуточного продукта (промпродукта) к выходу беспородной массы (концентрата) по результату процесса обогащения. К промпродукту относят фракции плотностью от 1400–1500 до 1800 кг/м³ для каменного угля и 1800–2000 кг/м³ для антрацитов. В зависимости от значения показателя обогатимости каменные угли и антрациты делят на четыре категории: от легкой (показатель обогатимости < 5%) до очень трудной (показатель обогатимости > 15%)⁵¹.

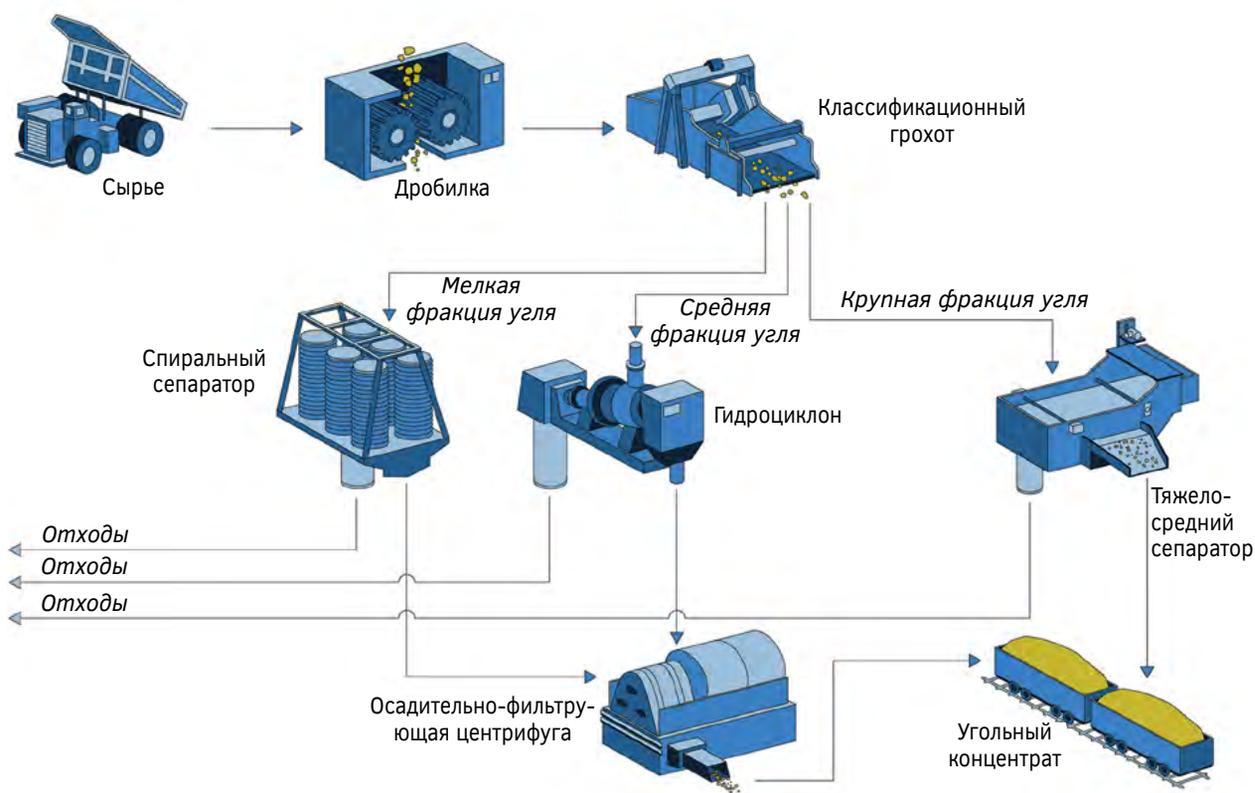


Рис. 1.7. Общая схема технологического процесса обогащения угля⁵²

В зависимости от обогатимости угля, добытого на определенном месторождении, применяют различные методы обогащения (табл. 1.13).

Гравитационное обогащение сухим способом применяется в редких случаях, поскольку оно пригодно лишь при обогащении легкообогатимого угля с крупностью кусков не более 80 мм, при этом образуются большие объемы пыли, которую необходимо улавливать. Применение сухого обогащения целесообразно лишь по отношению к углю с содержанием внешней влаги 3–5%, иначе потребуются подсушка. Даже в таких условиях при сухом обогащении наблюдается низкая эффективность по сравнению с мокрым процессом.

⁵¹ ГОСТ 10100–75. Угли каменные и антрацит. Метод определения обогатимости.

⁵² Там же.

Таблица 1.13. Основные способы обогащения угля и их применимость⁵³

Способ обогащения	Применимость способа
Гравитационное обогащение сухим способом	Легкообогащаемый уголь с малой крупностью кусков (до 80 мм) и 3–5% внешней влаги
Гравитационное обогащение мокрым способом	Все виды угля
Отсадка	Легкообогащаемый уголь
Обогащение в тяжелых средах	Труднообогащаемый уголь
Флотация	Угольный шлам (< 0,5 мм)

Мокрые гравитационное обогащение является наиболее универсальным и широко распространенным способом. Отсадка применяется преимущественно для легкообогащаемого угля, а обогащение в тяжелых средах — для труднообогащаемого.

Флотация применяется исключительно для обогащения угольных шламов (например, подрешеточного продукта) — мелкодисперсных частиц с крупностью обычно менее 0,5 мм. Электрическая сепарация и прочие методы применяются крайне редко.

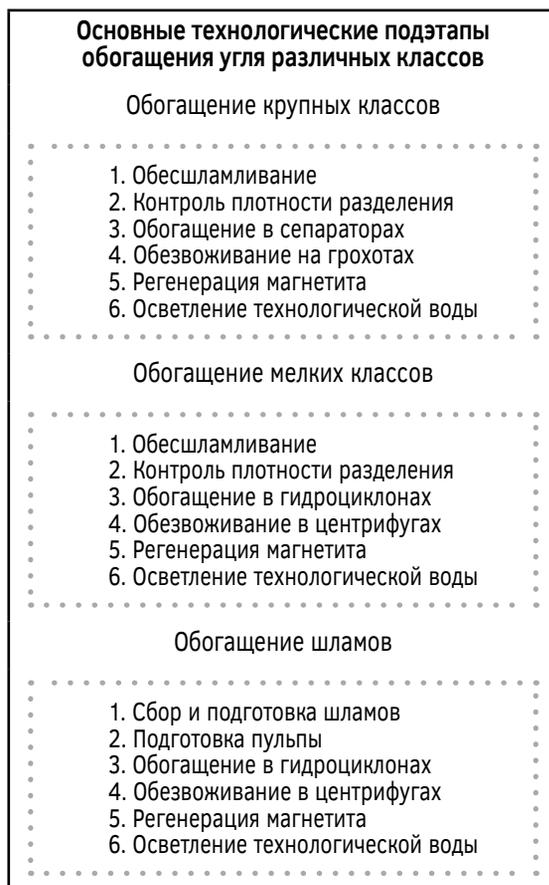


Рис. 1.8. Основные технологические подэтапы обогащения угля различных классов крупности⁵⁴

⁵³ ИТС 37–2017. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Добыча и обогащение угля.

⁵⁴ Там же.

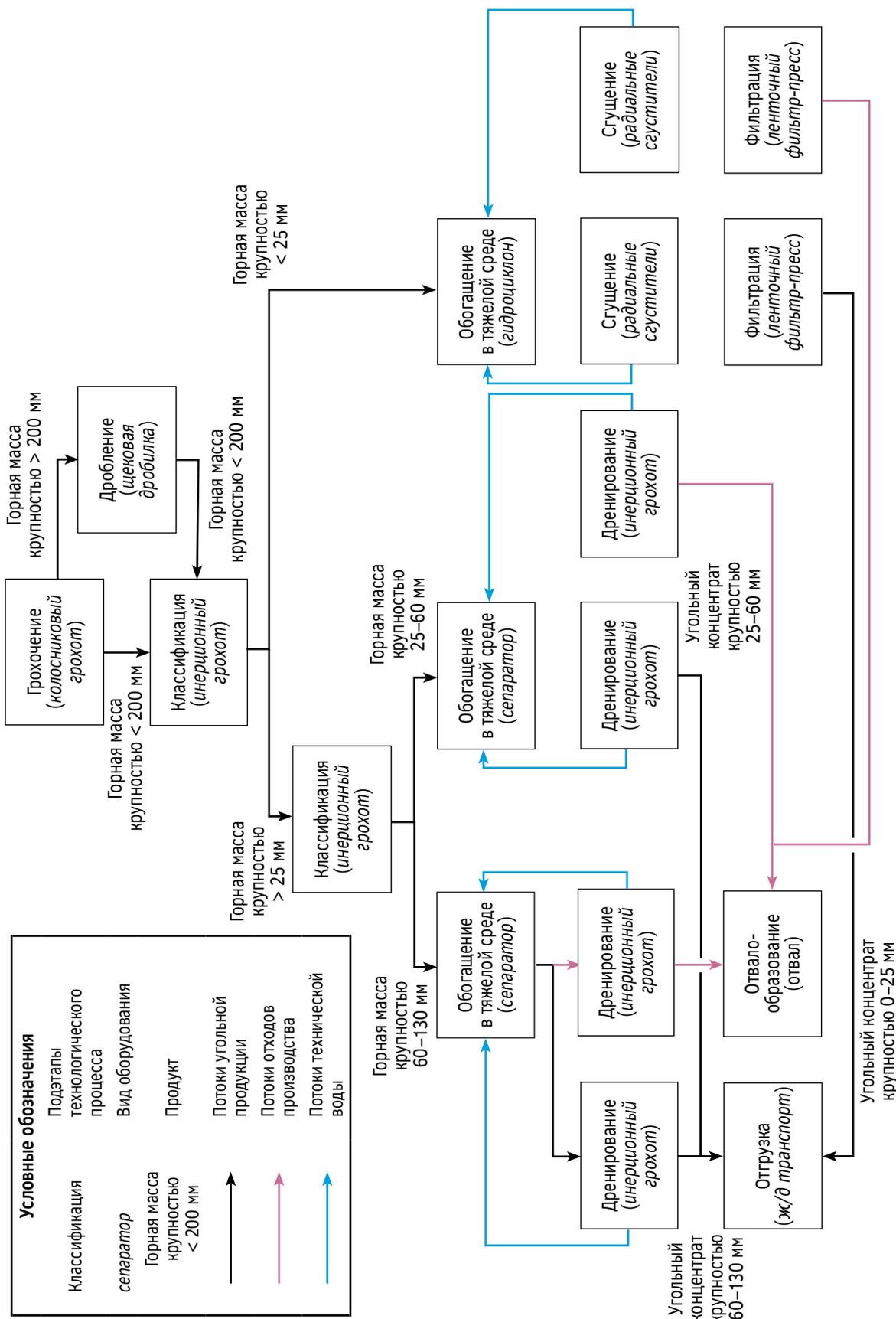


Рис. 1.9. Типовая схема потоков угля, отходов производства и технической воды по подэтапам технологического процесса
 Источник: ИТС 37–2017. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Добыча и обогащение угля.

Таблица 1.14. Основные этапы обогащения угля⁵⁵

№	Этап процесса (подпроцесс)	Основное технологическое оборудование
1	Прием угля	Устройства для передвижки вагонов, вагоноопрокидыватели, рыхлители, железоотделители, погрузчики
2	Подготовительные процессы	Питатели, дробилки, классификаторы, грохоты, дуговые сита
2.1	Дробление	Дробилки, железоотделители
2.2	Сортировка сырья по крупности	Классификаторы, грохоты
2.2.1	Грохочение ⁵⁶	Грохоты
2.2.2	Классификация	Классификаторы, грохоты
2.2.3	Обесшламливание угля	Дуговые сита, грохоты
3	Гравитационное обогащение	Сепараторы, отсадочные машины, концентрационные столы, шлюзы, желоба, насосы, гидроциклоны
3.1	Обогащение в тяжелых средах	Тяжелосредные сепараторы, тяжелосредные гидроциклоны, насосы
3.2	Обогащение отсадкой (не применяется для шламов)	Отсадочные машины, насосы
3.3	Обогащение в наклонно текущем потоке	Концентрационные столы, шлюзы, желоба, винтовые сепараторы, насосы, сепараторы противоточные
3.4	Сухое обогащение	Сепараторы, отсадочные машины
4	Флотация (только для шламов)	Флотационные машины, насосы, станция приготовления флокулянтов
5	Электрическая сепарация (только для шламов)	Электростатические, коронные, диэлектрические, трибоадгезионные, комбинированные сепараторы
6	Специальные методы обогащения	Амальгаматоры, сита, магнитные и термоманитные сепараторы, аэросуспензионные сепараторы, рентгенометрические сепараторы, сепараторы обогащения по форме, трению и объемной прочности и т. д.
7	Обезвоживание, сгущение, сушка	Бункеры, грохоты, элеваторы, центрифуги, фильтры, сушильные аппараты, насосы
7.1	Дренаживание	Грохоты, элеваторы
7.2	Центрифугирование	Центрифуги
7.3	Сгущение	Отстойники
7.4	Фильтрация	Фильтр-прессы, вакуум-фильтры, гипербар-фильтры
7.5	Сушка	Барабанные сушилки, трубы-сушилки, прочие сушилки
8	Брикетирование	Прессы (ударные, валковые, вальцовые, шнековые), экструдеры, гомонезаторы, конвейеры, дозаторы, мешалки, сушильный аппарат, бункеры, грохоты, питатели, насосы
9	Складирование и отгрузка угля	Штабелеукладчики, дробилки, погрузчики, грохоты, экструдеры, конвейеры, толкатели, питатели, весы
10	Природоохранные технологии	Пылеулавливающие установки, водно-шламовое хозяйство, отстойники, установки для хлорирования воды, биоокислительные каналы, нефтеловушки, отвалообразователи, автосамосвалы, бульдозеры, погрузчики, конвейеры
10.1	Предотвращение загрязнения атмосферного воздуха	Пылеулавливающие установки
10.2.1	Осветление оборотных вод	Водно-шламовое хозяйство
10.2.2	Очистка сточных вод	Отстойники, установки для хлорирования воды, биоокислительные каналы, нефтеловушки
10.3	Обращение с отходами производства	Отвалообразователи, автосамосвалы, бульдозеры, погрузчики, конвейеры

⁵⁵ ИТС 37–2017. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Добыча и обогащение угля.

⁵⁶ Грохочение также применяется на последующих этапах технологического процесса для обезвоживания и подготовки угольного концентрата к отгрузке.

При обогащении угля любым способом используются энергоресурсы (электроэнергия, нефтепродукты и т. д.). При обогащении угля самым распространенным способом — гравитационным мокрым — используется вода. Большая часть воды, используемой при обогащении угля мокрым гравитационным способом, циркулирует по замкнутой схеме с возвратом в технологический процесс. В связи с этим забор свежей воды на обогащение угля удается сократить в несколько раз. Кроме того, при обогащении зачастую применяются различные материалы — технические жидкости, магнетит, флокулянты, коагулянты и т. д.

Расход материалов и энергоресурсов на тонну угольного концентрата и, как следствие, количество выбросов, сбросов и образующихся отходов зависят не только от принципиальной технологической схемы производства, но и от сложности обогащения углей, поэтому удельные расходные показатели по материалам и энергоресурсам (на тонну угольного концентрата) различаются в несколько раз (табл. 1.15).

Таблица 1.15. Расход сырья, материалов и энергоресурсов⁵⁷

Наименование	Единицы измерений	Расход на 1 т продукции	
		минимальный	максимальный
Электроэнергия	кВт·ч/т	3,2	19,3
Свежая вода	м ³ /т	0,001	0,2
Оборотная вода	м ³ /т	0,2	6,8
Потребление топлива (твердого)	т у. т./т	0,001	0,02
Потребление пара	Гкал/т	0,002	16

СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ

Сравнение технологий добычи угля по технологическим циклам

Для сравнения технологий добычи угля по технологическим циклам необходимо определить показатели, пригодные для сравнения согласно соответствующим условиям:

- актуальность на протяжении всех технологических циклов развития угольной промышленности;
- наличие сопоставимых статистических данных за рассматриваемый период.

В качестве наиболее распространенных критериев, характеризующих угольную промышленность, можно выделить: ресурсоемкость, энергоемкость, экологичность, трудоемкость. Учитывая изменение используемых ресурсов в течение истории, критерий ресурсоемкости не пригоден для сравнения технологий добычи угля на всех технологических циклах. Экологичность и энергоемкость добычи угля не отражены статистическими данными за продолжительный период времени, что также не позволяет использовать их для сравнения. Поэтому сравнение технологий различных технологических циклов развития угольной промышленности производилось по критерию трудоемкости, причем для сравнения применялся показатель среднеотраслевой производительности труда (отношение объема добычи угля к численности занятых в отрасли).

Наличие статистического ряда данных позволило провести сравнение среднеотраслевой производительности труда в добыче угля России и СССР с 1890 г., который относится

⁵⁷ ИТС 37–2017. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Добыча и обогащение угля.

к третьему технологическому циклу в принятой классификации. Удельное значение добычи на одного работника угольной отрасли в тот период находилось в диапазоне 55–162 т/чел. Рост удельной добычи был связан с активным развитием и внедрением механизированного оборудования, что положительно отразилось на трудоемкости процесса добычи и транспортировки угля на поверхность из горных выработок. Технологическая оснащенность в период первого и второго технологических циклов развития угольной промышленности позволяет предположить прямую зависимость производительности труда от уровня механизации добычи угля. Как следствие, трудоемкость добычи в период до 1890 года была выше.

Активное развитие электрооборудования и рост объемов добычи угля открытым способом позволили увеличить производительность труда в четвертом технологическом цикле до уровня 303–896 т/чел.

Снижение производительности в начале пятого технологического цикла до 336 т/чел. в 1995 г. связано с увеличением доли убыточных предприятий. Последующая реструктуризация отрасли, наряду с расширением открытой добычи, позволила увеличить производительность до 2691 т/чел. в 2017 г. Таким образом, средняя производительность в течение прошедшего периода пятого технологического цикла увеличилась в 2,4 раза по сравнению с четвертым технологическим циклом и в 13 раз по сравнению с рассмотренным периодом третьего технологического цикла.

На рис. 1.10 представлены объемы добычи угля и показатель производительности труда в рамках технологических циклов развития отрасли.



Рис. 1.10. Объемы добычи угля и показатель производительности труда в рамках технологических циклов развития отрасли⁵⁸

⁵⁸ Составлено по данным: Уголь: Об отрасли. — URL: <https://minenergo.gov.ru/node/433> (дата обращения: 29.10.2019); Грунь В. Д. История угледобычи в России.

Сравнение применяемых технологий добычи угля

Сравнение применяемых в настоящее время технологий целесообразно производить по основным показателям ресурсосбережения и энергоэффективности, так как данные показатели относятся к важнейшим задачам развития современных технологий. Добыча угля осуществляется подземным (шахтным) или открытым (на карьерах) способом в зависимости от глубины залегания породы.

Открытый способ добычи угля используется преимущественно при глубине залегания породы до 100–150 метров. На участке месторождения механизированным способом снимается верхний слой почвы (вскрышные породы), после чего производится дробление породы при помощи горного оборудования (главным образом, экскаваторов) или буровзрывным способом. Открытый способ добычи не предполагает строительства шахты, что определяет ряд преимуществ по сравнению с подземным способом добычи:

- добыча угля открытым способом характеризуется меньшей продолжительностью подготовительных работ, что позволяет быстрее выйти на проектную мощность и требует меньше капитальных затрат;
- используемая при проведении добычи угля открытым способом техника обладает более высокими показателями производительности, так как нет ограничений по размерам и маневренности;
- открытые горные выработки характеризуются большей безопасностью и лучшими условиями труда по сравнению с добычей угля на шахтах;
- на разрезах осуществляется обычно более полная выемка угля, чем на шахтах.

Подземный способ добычи применяется при значительной глубине залегания пластов угля. До места залегания угля прокладывают вертикальные и (или) горизонтальные стволы, которые формируют шахту. Уголь при помощи выемочного комбайна дробится и по конвейерной системе доставляется до подъемников. По причине больших затрат на строительство и эксплуатацию шахты подземный способ применяется преимущественно для добычи угля коксующихся марок.

К преимуществам добычи угля подземным способом относятся меньшее негативное воздействие, оказываемое на окружающую природную среду, по сравнению с открытой добычей, главным образом, за счет меньшей площади нарушенных земель, но более высокими удельными показателями расхода электроэнергии по сравнению с добычей угля открытым способом (рис. 1.11–1.12).

Добыча угля открытым способом получает все большее развитие, объемы добытого этим способом угля растут. Однако естественным ограничением применения открытого способа добычи служат горно-геологические условия, связанные с мощностью и глубиной залегания угольных пластов. Кроме того, добыча угля открытым способом отличается большим удельным расходом топлива (в основном, за счет моторного топлива) в сравнении с подземным способом.

Эффективность открытого способа добычи угля в конкретных случаях определяется величиной коэффициента вскрыши (отношение массы (объема) вскрышной породы к массе добываемого угля). В зависимости от значения коэффициента проводится оценка возможности разработки месторождения открытым способом, определение целесообразной глубины разреза, расчет необходимого количества техники и оборудования на время работы разреза, планирование себестоимости добываемого угля⁵⁹.

⁵⁹ Технология добычи минерально-сырьевых ресурсов. — Тверь, 2012.

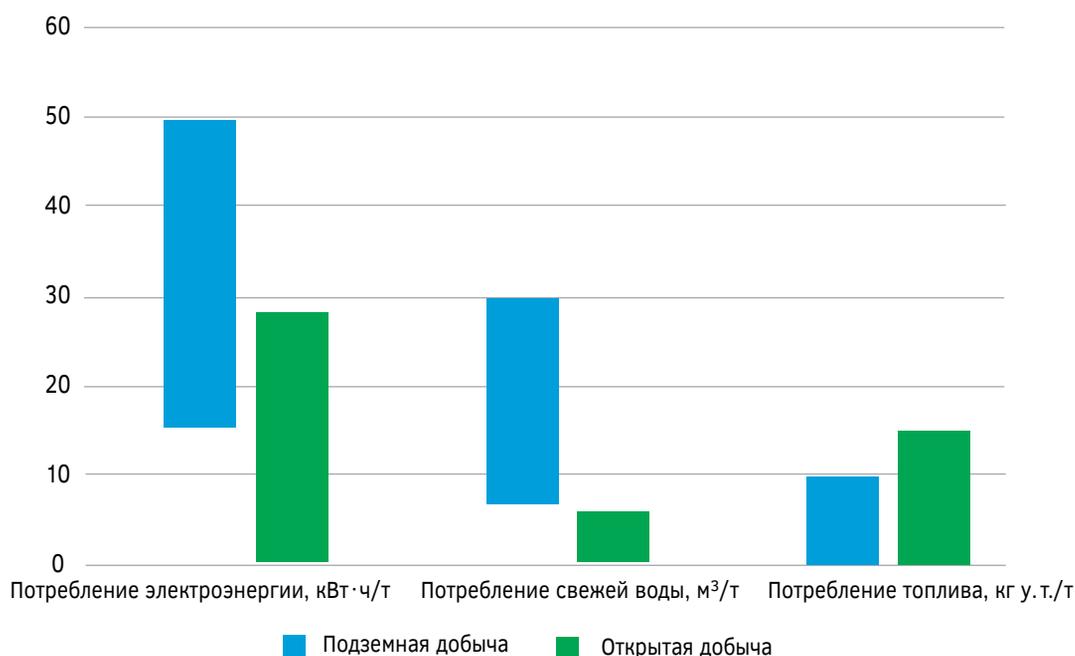


Рис. 1.11. Сравнение технологий

Источник: ИТС 37–2017. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Добыча и обогащение угля.

Сравнение негативного воздействия добычи угля открытым и подземным способами на окружающую среду проводилось на основании маркерных показателей, отобранных на основании критериев определения наилучших доступных технологий (НДТ) информационно-технического справочника по добыче и обогащению угля⁶⁰.

Согласно Федеральному закону⁶¹ термин «наилучшие доступные технологии» — это технология производства продукции (товаров), выполнения работ, оказания услуг, определяемая на основе современных достижений науки и техники и наилучшего сочетания критериев достижения охраны окружающей среды при условии наличия технической возможности ее применения.

Для определения маркерных веществ из перечня выбросов загрязняющих веществ в атмосферу и сбросов загрязняющих веществ в водные объекты при добыче и обогащении угля в ИТС-37 приняты следующие критерии маркерных веществ:

- вещество оказывает негативное воздействие на окружающую среду;
- вещество характерно исключительно для рассматриваемого технологического процесса;
- вещество присутствует в эмиссиях в значительном количестве и на подавляющем большинстве рассматриваемых предприятий.

В табл. 1.16, 1.17 представлено сравнение удельных показателей выбросов и сбросов маркерных веществ по технологиям добычи и обогащения угля, а также технологический показатель для технологий, относящихся к перечню НДТ. Эти данные показывают, что при добыче угля открытым способом выбросы пыли и сбросы загрязняющих веществ существенно выше, чем при добыче подземным способом.

⁶⁰ ИТС 37–2017. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Добыча и обогащение угля.

⁶¹ Федеральный закон от 10.01.2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды», ст. 1.

Таблица 1.16. Сравнение выбросов маркерных веществ в атмосферу при добыче и обогащении угля⁶²

Вид деятельности	Маркерное вещество	Удельный объем и/или масса выбросов загрязняющих веществ после очистки, г/т	Технологический показатель НДТ, г/т*
Добыча угля подземным способом	Пыль неорганическая	0,001–106,0	≤ 85,0
Добыча угля открытым способом	Пыль неорганическая	14,5–897,0	≤ 598,0
Обогащение угля	Пыль неорганическая	0,6–35,0	≤ 23,3
Обогащение угля**	Пыль неорганическая	0–216,0	≤ 144,0

* Показатель для добычи указан на тонну добытого угля, для обогащения — на тонну обогащенного угля.

** Для предприятий, осуществляющих термическую сушку угля.

Таблица 1.17. Сравнение сбросов маркерных веществ в водные объекты при добыче угля⁶³

Вид деятельности	Маркерное вещество (показатель)	Удельный объем и/или масса выбросов загрязняющих веществ после очистки, г/т	Технологический показатель НДТ, г/т*
Добыча угля подземным способом	Кислотность воды	–	5,5–9 pH
	Взвешенные вещества	3,1–147,0	≤ 98,0
	Железо	0–3,5	≤ 2,3
	Нефть и нефтепродукты	0–1,0	≤ 0,7
Добыча угля открытым способом	Кислотность воды	–	5,5–9 pH
	Взвешенные вещества	0–429,9	≤ 286,6
	Железо	0–38,4	≤ 25,7
	Нефть и нефтепродукты	0–1,1	≤ 0,7

* Показатели указаны на тонну добытого угля.

Таблица 1.18. Образование вскрышных и вмещающих отходов при добыче угля⁶⁴

Вид деятельности	Наименование	Класс опасности	Единицы измерений	Объем и/или масса образования отходов до очистки в расчете на тонну продукции
Добыча угля подземным способом	Вмещающие породы	V	кг/т	2,9–307,4
Добыча угля открытым способом	Вскрышные породы и отходы добычи угля	IV–V	т/т	1,9–34,4

⁶² ИТС 37–2017. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Добыча и обогащение угля.

⁶³ Там же.

⁶⁴ Там же.

Наибольшие удельные показатели образования отходов при добыче угля приходится на вмещающие породы при подземной добыче и вскрышные породы и отходы добычи угля при открытой добыче угля (табл. 1.18). Данные отходы являются наименее опасными видами отходов: они относятся к IV–V классам опасности (практически неопасные отходы).

К остальным видам отходов, формирующихся при добыче угля, относятся: лампы ртутные, ртутно-кварцевые, люминесцентные (относятся к I (наивысшему) классу опасности), аккумуляторы и кислота аккумуляторная (II класс опасности), отходы масел и нефтепродуктов (III класс опасности), а также оргтехника, зола и шлак (образуются при сжигании угля в котельных и при электросварке), отходы систем водоснабжения и водоочистки, резина и пластмассы, коммунальные отходы, металлолом, которые относятся к малоопасным и наименее опасным классам отходов.

Утилизация опасных отходов практически во всех случаях угледобывающими предприятиями не осуществляется, эти отходы передаются для утилизации и захоронения специализированным организациям. Кроме того, эти виды отходов не являются специфичными для угольной отрасли: они формируются во многих других отраслях промышленности и экономической деятельности.

Отходы малоопасного и наименее опасного классов также в большинстве своем не являются специфичными для угольной отрасли. Например, зола и шлак образуются в процессе сжигания твердого топлива в котельных, металлолом — в процессе ремонта оборудования и т. д. В качестве специфичных отходов рассматриваются вмещающие породы.

При этом объемы образования отходов загрязняющих веществ на тонну угля различаются в несколько раз, а нередко на 2–3 порядка, что обусловлено как используемыми технологиями производства, так и горно-геологическими условиями месторождений. В силу этого выбор каких-либо видов отходов для установления технологических показателей невозможен⁶⁵.

Прочими факторами негативного воздействия на окружающую среду от добычи угля подземным способом являются шум и вибрация. Шумовое воздействие осуществляется многочисленными видами оборудования: буровыми установками, выемочно-погрузочной техникой, транспортными средствами и т. д. Вибрационное воздействие связано с работой комбайнов, буровых установок и другого горношахтного оборудования. Снижение шумового воздействия обеспечивается применением глушителей шума, шумоизоляции, беруш и противошумных наушников, а также путем ограничения времени пребывания в условиях высокого шума. Снижение вибрационного воздействия обеспечивается средствами виброзащиты⁶⁶.

РОЛЬ УГЛЕДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В ГЛОБАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКЕ

Уголь применяется в различных областях промышленности: его используют для получения электрической энергии (энергетический уголь), как сырье для металлургической (коксующийся уголь) и химической промышленности (углехимия), производства графита, извлечения редких и рассеянных элементов. Широкое распространение угля стало возможно благодаря низкой себестоимости и значительными запасами по сравнению с другими источниками энергии. По данным Международного энергетического агентства, в период 2000–2017 гг. доля угля в мировой структуре производства электроэнергии находилась в диапазоне 38–41%.

Промышленную добычу угля в мире осуществляют более 60 стран, однако 90,0% объема мировой угледобычи приходится на долю 10 стран (рис. 1.12), крупнейшими из которых являются Китай, Индия, США и Австралия. Россия занимает 6-е место по добыче угля в мире.

⁶⁵ Там же.

⁶⁶ Там же.

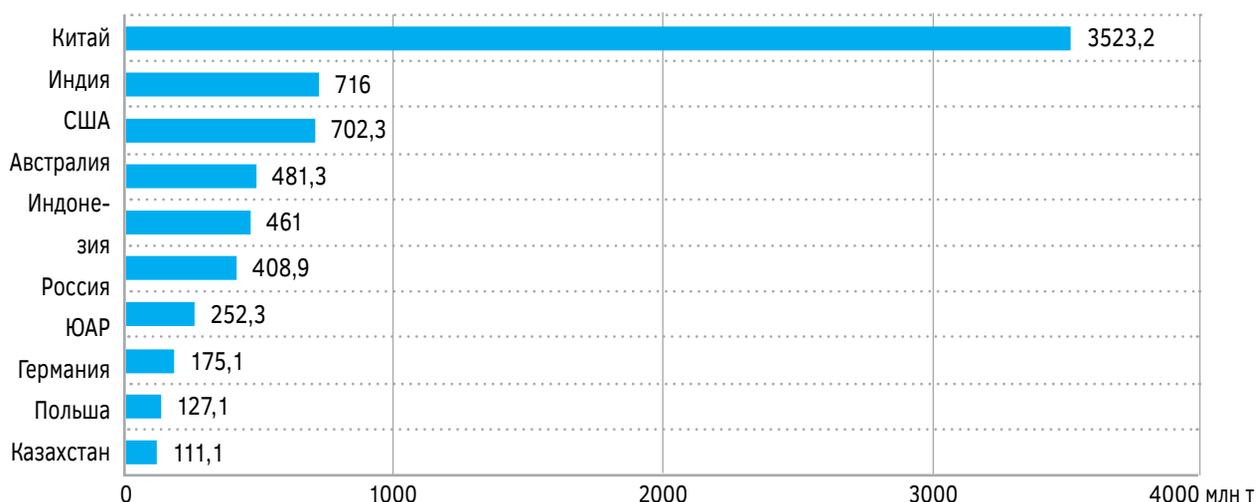


Рис. 1.12. Производство угля крупнейшими странами-углепроизводителями в 2017 г.⁶⁷

Наиболее активное развитие угольная отрасль получила на протяжении последних 20 лет, в течение которых в большинстве стран отмечен существенный рост добычи угля: наибольший темп роста зафиксирован в Индонезии (более 10 раз), в Китае (в 2,5 раза), в Австралии и Индии (более чем в 2 раза), в России (в 1,5 раза), а также в ЮАР и Казахстане (в 1,2 раза)⁶⁸. Ряд крупнейших производителей сократили добычу угля: США и Германия — почти на 30%, Польша — на 65%. Причины падения угледобычи в США связаны с началом промышленной добычи сланцевого газа, в результате которой большая часть предприятий электроэнергетики отказалась от использования угля и перешла на газовое топливо. Германия и Польша вынуждены сокращать объемы производства под давлением экологической политики национальных правительств и Евросоюза, которая предполагает сокращение вредных выбросов от сжигания угля с целью защиты окружающей среды. Учитывая высокую роль угля в энергетике этих стран (в Польше до последнего времени более 90% электроэнергии производилось на угольных ТЭС), сокращение угледобычи негативно сказывается на состоянии их экономики.

Мировая угледобыча достигла пика к 2013 г., когда объем добытого угля составил 8270,9 млн т (3978,9 т н. э.)⁶⁹. В период 2013–2017 гг. добыча угля начала постепенно снижаться: в 2017 г. объем мировой добычи составил уже 7727,3 млн т (93,4% от уровня 2013 г.). Данная тенденция отмечена практически во всех регионах мира, за исключением Южной Америки и Африки, где за этот период производство даже несколько выросло.

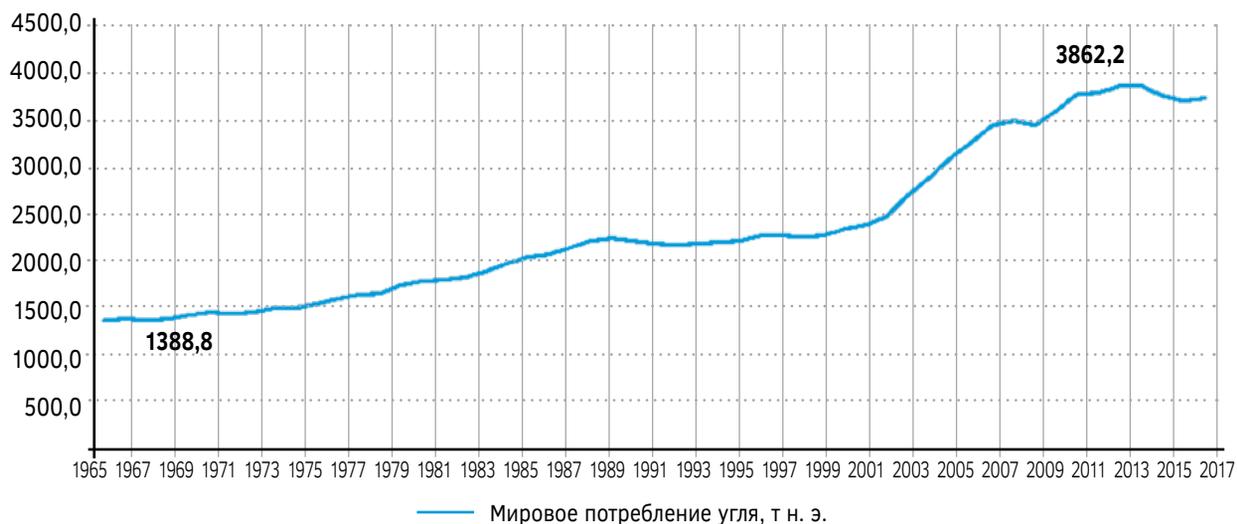
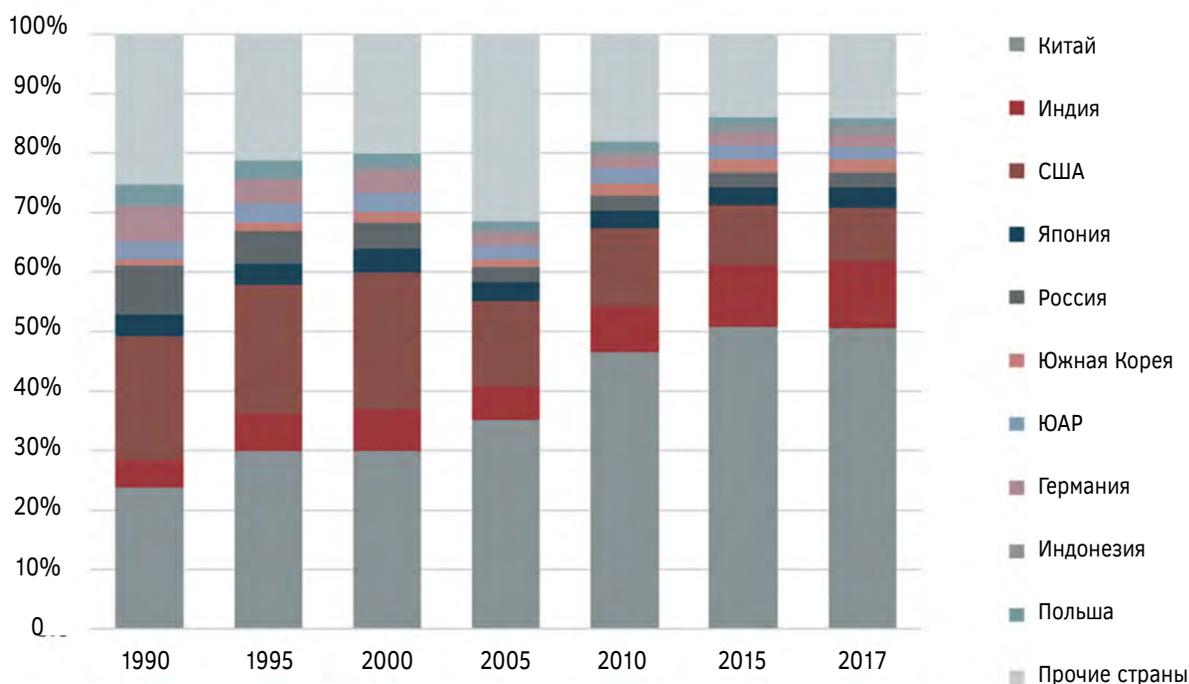
Лидером потребления угля является Китай, на долю которого приходится более половины мирового потребления. Всего на долю первой десятки крупнейших углепотребителей приходится более 85% объема мирового потребления. Россия занимает пятое место в мире по объему потребления угля.

Потребление угля в Индии, Японии, Республике Корея, Индонезии продолжает расти. Сокращается потребление угля в Германии, Польше и других странах ЕС (рис. 1.14).

⁶⁷ По данным ФГБУ «ЦДУ ТЭК» (Уголь России и мира: производство, потребление, экспорт, импорт. — URL: http://www.cdu.ru/tek_russia/articles/5/499/) и Statistical Review of World Energy — all data, 1965–2017 (2018. — URL: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>).

⁶⁸ http://www.cdu.ru/tek_russia/articles/5/499/

⁶⁹ <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-coal.pdf>

Рис. 1.13. Динамика мирового потребления угля⁷⁰Рис. 1.14. Доля потребления угля крупнейших стран-потребителей в мировом потреблении, %⁷¹

В России производство угля на протяжении последних лет возрастает, главным образом, за счет роста спроса на российскую угольную продукцию на мировом рынке. При этом потребление угля внутри страны сократилось в два раза за период 1990–2017 гг.

⁷⁰ Statistical Review of World Energy — all data, 1965–2017. URL: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html> (accessed: 04.10.2019).

⁷¹ Уголь России и мира: производство, потребление, экспорт, импорт. — URL: http://www.cdu.ru/tek_russia/articles/5/499/ (дата обращения: 04.10.2019).

Доля мировых поставок угля составляет около 15% от объема его добычи, что свидетельствует о том, что большинство добываемого угля используется угледобывающими странами для собственных нужд. Однако крупнейшие экспортеры угля, к которым относятся Австралия, Индонезия, Россия, Колумбия (их экспорт обеспечивает более 80% мировых поставок), продолжают наращивать поставки.

Доля России в мировом экспорте угля в 2017 г. составила около 18%, при этом экспортные поставки угля за период 1995–2018 гг. увеличились более, чем в 6 раз (с 30 до 199 млн т). Особенностью российского экспорта угля является удаленность основных месторождений от морских портов и стран-потребителей, что обуславливает значительную долю транспортной составляющей в цене угля, а это, в свою очередь, негативно сказывается на конкурентоспособности на мировом рынке.

К крупнейшим странам-импортерам угля относятся Китай и Индия (рис. 1.15), которые также являются крупнейшими производителями угля. Столь высокий спрос на уголь в этих странах связан с высокими темпами роста экономики и значительной долей угля в энергобалансе. Многие другие страны — импортеры угля сконцентрированы в Азиатско-Тихоокеанском регионе (рис. 1.15), что делает его основным и наиболее перспективным рынком. Развитие угольных портов Дальнего Востока, а также Восточного полигона ОАО «РЖД» способствует снижению транспортных издержек, что увеличивает потенциал дальнейшего развития экспортных поставок из России.

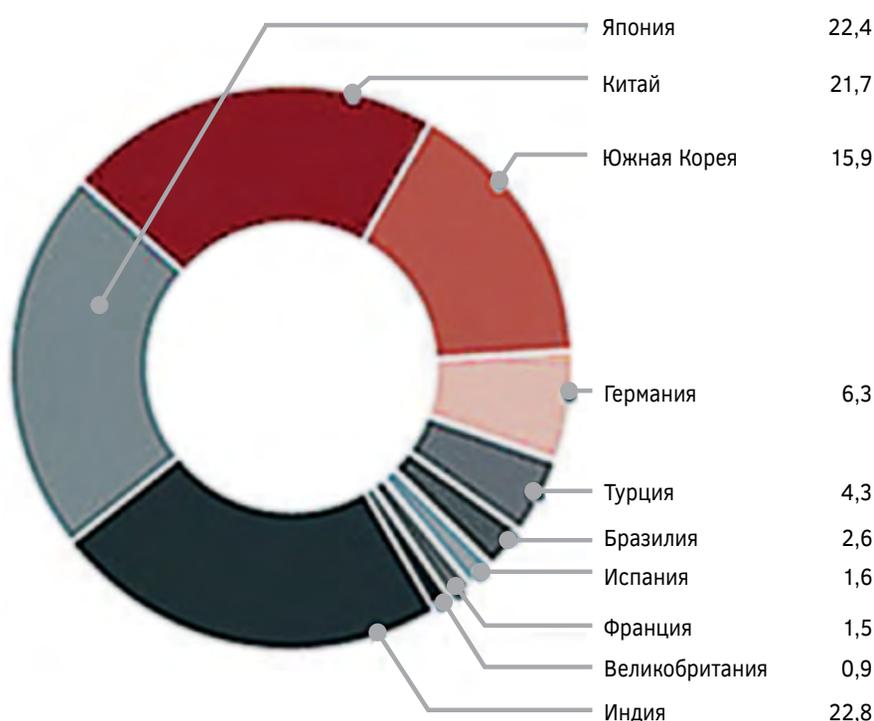


Рис. 1.15. Структура мирового импорта угля в 2017 г., %⁷²

⁷² Уголь России и мира: производство, потребление, экспорт, импорт. — URL: http://www.cdu.ru/tek_russia/articles/5/499/ (дата обращения: 04.10.2019).

ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ

Развитие технологий в угольной промышленности России, которые могут привести к повышению производительности труда в отрасли, можно подразделить на проекты в следующих областях:

- геологоразведка;
- добыча;
- переработка;
- транспортировка;
- повышение технологической и экологической безопасности;
- добыча, переработка и утилизация шахтного метана⁷³.

Инновационные технологии в области геологоразведки

В области геологоразведки новые научно-технические решения направлены на разработку методов, повышающих точность определения параметров залегания угольных пластов. В настоящее время существует ряд проектов, которые поэтапно до 2030 г. должны «выйти» на стадию эксплуатации. К ним относятся:

- внедрение лазерных аналитических технологий и использование улучшенного моделирования для повышения точности датчиков;
- использование лазерных технологий при разработке переносных ручных приборов для химического экспресс-анализа на месте;
- разработка скважинных радаров для измерения параметров во время бурения;
- развитие геофизического моделирования для улучшения программного моделирования и планирования добычи;
- развитие методов обнаружения, визуализации, интерполяции, моделирования и прогноза геологических аномалий приборами, размещающимися перед рабочим органом горного оборудования и др.;
- развитие методов виртуального сопоставления геологической информации.

Инновационные технологии добычи угля

Развитие инновационных технологий в области добычи угля направлено главным образом на:

- циклично-поточные технологии, которые предполагают применение поточного (непрерывно действующего) конвейерного транспорта для перемещения горных пород в технологическом потоке в сочетании с циклическими буровзрывными работами и циклично действующими одноковшовыми экскаваторами (или погрузчиками) в забое, осуществляющими выемку и погрузку взорванной горной массы на конвейер или (чаще) в бункер дробилки или грохота;
- поточные технологии, которые отличаются полным совмещением во времени рабочих процессов и операций по добыче (извлечению) и непрерывной выдачей полезного ископаемого в течение времени, предусмотренного экономически обоснованным режимом работы;
- роботизированные технологии, которые предполагают использование в поточных технологиях полностью автоматизированного оборудования;
- скважинные технологии извлечения угля (включая его газификацию и гидролизацию), которые предполагают создание подземного газогенератора путем формирования

⁷³ Плакиткина Л. С. Интенсификация инновационного процесса в угольной промышленности России // Горная промышленность. — 2011. — № 3 (97). — С. 4. — URL: <https://mining-media.ru/ru/article/newtech/126> (дата обращения: 04.01.2019).

сбросочного канала между скважинами или приведение угля в подвижное состояние путем гидромеханического воздействия на пласт и выдачи его в виде гидросмеси на поверхность⁷⁴;

- селективные технологии, которые предполагают раздельное извлечение угля разной сортности и пустых пород;
- гидрозабойка и гидрогелевая забойка. В качестве материалов для гидрозабойки обычно применяется вода, в зимний период при открытой добыче угля возможно также применять водные растворы солей NaCl и CaCl₂ или снежно-ледяную смесь. Для уменьшения пылевыведения при массовых взрывах может применяться забойка скважин гидрогелем. Гидрогель изготавливают на специальном заправочном пункте или непосредственно в баках машины, предназначенной для заполнения скважин гидрогелем.

К перспективным технологиям в области транспортировки угля относится дальнейшая электрификация транспорта, что позволит сократить выбросы загрязняющих веществ от работы двигателя внутреннего сгорания и повысить безопасность горных выработок.

Некоторые передовые технологии в области добычи угля уже начали реализовываться в отдельных российских компаниях по добыче угля. Примеры такого применения:

- Технология отработки «нераспачкованных» пластов с глубиной залегания более 300 м применена на разрезе «Восточный» в Кузбассе (ХК «СДС-Уголь»). Данная технология предполагает более полную отработку пластов и внутреннее отвалообразование, что позволяет сохранить сельскохозяйственные земли.
- Поточная технология с полной конвейеризацией транспорта добытого угля при наклонном падении угольных пластов и отработке вскрышных пород внедрена на разрезе «Восточный».
- Технологии открыто-подземной добычи угля при отсутствии людей в очистных забоях внедряются на разрезе «Распадский».
- Проект «Умный разрез», реализуемый ХК «СДС-Уголь» на разрезе «Первомайский» на участке Соколовского месторождения Кемеровской области, уже введен в эксплуатацию. К особенностям технологии относятся рекультивация земли в течение всего времени работы предприятия и транспортировка угля и породы конвейерно-ленточным способом.

Добыча, переработка и утилизация метана

В России 70% шахт относятся к метаноопасным шахтам III категории, сверхкатегорийным и выбросоопасным⁷⁵. При этом, по данным АО «Газпром промгаз», прогнозные ресурсы метана в основных угольных бассейнах России оцениваются в 83,7 трлн м³, что соответствует примерно трети прогнозных ресурсов природного газа страны. Значительные запасы газа и потенциал повышения безопасности добычи угля определяют важность развития извлечения и переработки метана, содержащегося в угольных пластах. Следует отметить, что в 2011 г. метан угольных пластов был признан в России самостоятельным полезным ископаемым и внесен в Общероссийский классификатор полезных ископаемых и подземных вод⁷⁶. К высокоперспективным относятся Кузнецкий (13,1 трлн м³) и Печорский

⁷⁴ Плакиткина Л. С. Интенсификация инновационного процесса в угольной промышленности России.

⁷⁵ Кудинов Е. В. Проект добычи метана из угольных пластов в Кузбассе. Круглый стол: Дегазация, добыча и утилизация метана угольных месторождений. Российская энергетическая неделя. Устойчивая энергетика меняющегося мира [электронная презентация]. — 34 с. — URL: https://minenergo.gov.ru/sites/default/files/10/25/12815/4_2_2_Degazaciya_dobycha_i_utilizaciya_metana_ugolnyh_mestorozhdeniyKudinov_doklad_na_Ross_energ_nedele_04_10_18.pdf (дата обращения: 04.01.2019).

⁷⁶ Приказ от 22 ноября 2011 года № 570-ст «О принятии и введении в действие Изменения 1/2011 ОКПИИПВ к Общероссийскому классификатору полезных ископаемых и подземных вод ОК 032–2002» / Минпромторг России. Росстандарт. — URL: <http://docs.cntd.ru/document/902318425> (дата обращения: 04.01.2019).

(1,9 трлн м³) угольные бассейны, в которых осуществляется попутная и промышленная добыча метана⁷⁷. Однако большинство проектов извлечения метана из угольных пластов характеризуются низкой экономической эффективностью. Разработка более рентабельных технологий извлечения метана может значительно увеличить потенциал данного направления.

На настоящий момент существует три направления извлечения метана из угольных пластов:

- дегазация угольных шахт с последующей утилизацией метана;
- добыча метана вне действующих или проектируемых шахт путем бурения с поверхности специальных скважин с применением искусственных способов повышения газопроницаемости угольных пластов (это направление является перспективным методом получения газа с высоким (75–95%) стабильным содержанием метана для широкого применения в народном хозяйстве);
- добыча метана из закрытых шахт.

Дегазация связана с необходимостью обеспечения безопасности труда шахтеров, снижения аварийности в угольных шахтах. Впоследствии к этим причинам добавились задачи повышения экологичности угледобычи и возможность использования получаемого при дегазации угольного метана⁷⁸. В рамках этой технологии метан разной концентрации является попутным полезным ископаемым.

Для совершенствования способов заблаговременного извлечения метана и угольных пластов ведутся работы в следующих основных направлениях:

- совершенствование технологии воздействия в режиме кавитации, которое включает выбор и разработку рабочих агентов и режимов воздействия, обеспечивающих реализацию механизма самоподдерживающегося разрушения угля в широком диапазоне горно-геологических условий;
- гидровоздействие вспенивающимися жидкостями с подачей в пласт в определенном режиме выбранных солей и кислот с обеспечением термодинамических условий, способствующих бурному выделению углекислого газа;
- поэтапная гидродинамическая обработка угольных пластов, использующая эффект набухания угля во время гидровоздействия;
- обработка угольных пластов с использованием эффекта гидроудара⁷⁹.

Основной задачей развития технологий интенсификации газоотдачи угольных пластов является установление эффективной связи ствола добывающей скважины с природной системой трещин в угольном пласте, обеспечивающей интенсивный приток метана к скважине. В настоящее время получили распространение следующие методы воздействия на пласты:

- гидравлический разрыв пластов;
- метод кавернообразования в необсаженном стволе скважины;
- бурение горизонтальных, наклонно-направленных и многозабойных скважин;
- закачка в угольные пласты диоксида углерода и азота.

В России для развития данного направления был создан научный полигон по отработке технологии добычи метана из угольных пластов и состоялся запуск первого метанугольного промысла.

Технологии угледобычи обладают значительным потенциалом повышения производительности, сокращения трудоемкости производства, повышения рентабельности отрасли, минимизации негативного воздействия на окружающую среду. Следует понимать, что для развития технологий угольной отрасли потребуются значительные инвестиции, а также комплекс мер государственной поддержки.

⁷⁷ Пармузин П. Н. Зарубежный и отечественный опыт освоения ресурсов метана угольных пластов : монография. — Ухта : УГТУ, 2017. — URL: <http://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-zarubezhnyy-i-otechestvennyy-opyt-osvoeniya-resursov-metana-ugolnyh-plastov.pdf> (дата обращения: 04.01.2019).

⁷⁸ Пармузин П. Н. Зарубежный и отечественный опыт освоения ресурсов метана угольных пластов.

⁷⁹ Там же.

СПИСОК ИСПОЛЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Васючков, Ю. Ф. Горное дело : учеб. для учащихся горн. техникумов / Ю. Ф. Васючков. — М. : Недра, 1990. — 512 с. — (Среднетехническое образование).
2. Введение в специальность. Основы экономики топливно-энергетического комплекса : учеб. пособие / Н. Д. Роголев, А. Г. Зубкова, В. Я. Пейсахович, О. А. Лыкова, Д. Г. Шувалова ; МЭИ. — М. : Изд. дом МЭИ, 2009. — 160 с.
3. Германия // Горная энциклопедия [сайт]. — URL: <http://www.mining-enc.ru/g/germaniya/> (дата обращения: 04.10.2019). — Загл. с экрана.
4. Глазьев, С. Ю. О стратегии развития экономики России : науч. докл. / С. Ю. Глазьев, В. В. Ивантер, В. Л. Макаров [и др.] ; под ред. С. Ю. Глазьева. — М. : ООИ РАН, 2011. — 48 с. — Препринт. — URL: http://russian-greens.ru/docs/dokl_new_economic_strategy.pdf (дата обращения: 04.01.2019).
5. ГОСТ 10100–75. Угли каменные и антрацит. Метод определения обогатимости. — Введ. 1976–01–01. — М. : Изд-во стандартов, 2004. — 45 с.
6. ГОСТ 1186–2014. Угли каменные. Метод определения пластометрических показателей. — Введ. 2016–04–01. — М. : Стандартиформ, 2015. — 18 с.
7. ГОСТ 19242–73. Угли бурые, каменные и антрацит. Классификация по размеру кусков, с изменениями. — Введ. 1975–01–01. — М. : Изд-во стандартов, [2002]. — 2 с.
8. ГОСТ 25543–2013. Угли бурые, каменные и антрациты. Классификация по генетическим и технологическим параметрам, с изменениями. — Введ. 2015–01–01. — М. : Стандартиформ, 2016. — 22 с.
9. Грунь, В. Д. История угледобычи в России / В. Д. Грунь, В. Е. Зайденварг, В. Г. Килимник, Ю. Н. Малышев ; под общ. ред. Б. Ф. Братченко. — М. : [ЗАО «Росинформуголь»], 2003. — 480 с.
10. Губанов, В. А. Этапы развития угольной промышленности: технико-технологический аспект / В. А. Губанов // Экономика. Право. Менеджмент. — 2014. — Вып. 2 (2). — URL: <http://izdatelstvo.bgu.ru/epm/dl.ashx?id=1396> (дата обращения: 04.01.2019).
11. Игошев, Б. М. История технических инноваций : учеб. пособие для школьников / Б. М. Игошев, А. П. Усольцев ; Урал. гос. пед. ун-т. — Екатеринбург, 2012. — 237 с.
12. История Германии : учеб. пособие : в 3 т. / под общ. ред. Б. Бонвеча, Ю. В. Галактионова. — М. : КДУ, 2008. — Т. 2 : От создания Германской империи до начала XXI века / А. М. Бетмакаев, Т. А. Бяликова, Ю. В. Галактионов [и др.] ; отв. ред. Ю. В. Галактионов ; сост. науч.-справ. аппарата А. А. Мить. — М. : КДУ, 2008. — 672 с. — URL: <https://history.wikireading.ru/156841> (дата обращения: 04.01.2019).
13. ИТС 37–2017. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Добыча и обогащение угля. — М. : Бюро НДТ, 2017. — 294 с. — URL: <http://docs.cntd.ru/document/556173717> (дата обращения: 04.01.2019).
14. Котурницкий, П. В. Паровые машины / П. Котурницкий // Энциклопедический словарь : в 86 т. / изд.: Ф. А. Брокгауз, И. А. Ефрон. — СПб., 1890–1907. — Т. XXII^A (44) : Оуэн — Патент о поединках. — СПб. : Типо-литогр. И. А. Ефрона, 1897. — С. 862–874.
15. Кудинов, Е. В. Проект добычи метана из угольных пластов в Кузбассе. Круглый стол: Дегазация, добыча и утилизация метана угольных месторождений. Российская энергетическая неделя. Устойчивая энергетика меняющегося мира [электронная презентация] / Е. В. Кудинов ; ООО «Газпром добыча Кузнецк». — 34 с. — URL: https://minenergo.gov.ru/sites/default/files/10/25/12815/4_2_2_Degazaciya_dobycha_i_utilizaciya_metana_ugolnyh_mestorozhdeniyKudinov_doklad_na_Ross_energ_nedele_04_10_18.pdf (дата обращения: 04.01.2019). — Загл. с экрана.
16. Пармузин, П. Н. Зарубежный и отечественный опыт освоения ресурсов метана угольных пластов : монография / П. Н. Пармузин ; УГТУ. — Ухта : УГТУ, 2017. — 109 с. — URL: <http://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-zarubezhnyy-i-otechestvennyy-opyt-osvoeniya-resursov-metana-ugolnyh-plastov.pdf> (дата обращения: 04.01.2019).
17. Плакиткина, Л. С. Интенсификация инновационного процесса в угольной промышленности России / Л. С. Плакиткина // Горная промышленность. — 2011. — № 3 (97). — С. 4. — URL: <https://mining-media.ru/ru/article/newtech/126> (дата обращения: 04.01.2019).
18. Приказ от 22 ноября 2011 года № 570–ст «О принятии и введении в действие Изменения 1/2011 ОКПИИПВ к Общероссийскому классификатору полезных ископаемых и подземных вод ОК 032–2002» / Минпромторг России. Росстандарт. — URL: <http://docs.cntd.ru/document/902318425> (дата обращения: 04.01.2019).
19. Рашевский, В. В. Качество углей ОАО «СУЭК» / В. В. Рашевский, В. Б. Артемьев, С. А. Силютин ; Сиб. угол. энергет. компания (СУЭК). — М. : Кучково поле, 2011. — 574 с. — (Серия «Библиотека горного инженера» ; т. 5, кн. 1).
20. Технология добычи минерально-сырьевых ресурсов : метод. разработка к расчетно-граф. работе для студ., обучающихся по спец. 280402 «Природоохранное обустройство территорий» : в составе учебно-методического комплекса / сост.: В. А. Беляков, А. Н. Болтушкин, О. С. Мисников ; Тверской гос. техн. ун-т, Каф. ГТП. —

- Тверь : ТвГТУ, 2011. — (УМК-М). — URL: <http://lib.tstu.tver.ru> (дата обращения: 05.01.2019).
21. Технология добычи минерально-сырьевых ресурсов / Федеральное агентство по образованию, Тверской гос. техн. ун-т. — Тверь, 2012.
 22. Уголь России и мира: производство, потребление, экспорт, импорт / ЦДУ ТЭК. — 2018. — URL: http://www.cdu.ru/tek_russia/articles/5/499/ (дата обращения: 04.10.2019). — Загл. с экрана.
 23. Угольная промышленность // Горная энциклопедия [сайт]. — URL: <http://www.mining-enc.ru/u/ugolnaya-promyshlennost> (дата обращения: 04.01.2019). — Загл. с экрана.
 24. Чернова, В. Э. Актуальность энергосбережения. Государственная политика в области повышения эффективности использования энергии : учеб. пособие / В. Э. Чернова, Т. В. Шмулевич ; СПбГТУРП. — СПб., 2014. — 68 с. — URL: <http://www.nizrp.narod.ru/metod/kaffiniuch/5.pdf> (дата обращения: 04.10.2019).
 25. Энергетика: история, настоящее и будущее : в 4 т. — Киев, 2005–2010. — Т. 1 : От огня и воды к электричеству / В. И. Бондаренко, Г. Б. Варламов, И. А. Вольчин [и др.]. — Киев : Изд. дом «АДЕФ-Украина», 2005. — 304 с.
 26. Statistical Review of World Energy — all data, 1965–2017 // BP p. l. c. [Official website]. — 2018. — URL: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html> (accessed: 04.01.2019). — Screen heading.

ДОБЫЧА УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ

Юрий Николаевич Линник

Государственный университет управления, профессор,
доктор технических наук

Владимир Юрьевич Линник

Государственный университет управления, профессор,
доктор экономических наук

ВВЕДЕНИЕ

Нефть

Нефть — полезное ископаемое, представляющее из себя маслянистую жидкость. Это горючее вещество, часто черного цвета, хотя цвет нефти в разных районах различается. Она может быть и коричневой, и вишневой, зеленой, желтой, и даже прозрачной. С химической точки зрения нефть — это сложная смесь углеводородов с примесью различных соединений, например серы, азота и других. Ее запах также может быть различным, так как зависит от присутствия в ее составе ароматических углеводородов, сернистых соединений.

Углеводороды, из которых состоит нефть, — это химические соединения, состоящие из атомов углерода (С) и водорода (Н). В общем виде формула углеводорода — C_xH_y . Простейший углеводород, метан, имеет один атом углерода и четыре атома водорода, его формула — CH_4 . Метан — легкий углеводород, всегда присутствует в нефти.

В зависимости от количественного соотношения различных углеводородов, составляющих нефть, ее свойства также различаются. Нефть бывает прозрачной и текучей, как вода. А бывает черной и настолько вязкой и малоподвижной, что не вытекает из сосуда, даже если его перевернуть.

С химической точки зрения обычная (традиционная) нефть состоит из следующих элементов:

- углерод — 84%,
- водород — 14%,
- сера — 1–3% (в виде сульфидов, дисульфидов, сероводорода и серы как таковой),
- азот — менее 1%,
- кислород — менее 1%,
- металлы — менее 1% (железо, никель, ванадий, медь, хром, кобальт, молибден и др.),
- соли — менее 1% (хлорид кальция, хлорид магния, хлорид натрия и др.).

Нефть (и сопутствующий ей углеводородный газ) залегает на глубинах от нескольких десятков метров до 5–6 километров. При этом на глубинах 6 км и ниже встречается только газ, а на глубинах 1 км и выше — только нефть. Большинство продуктивных пластов находятся на глубине между 1 и 6 км, где нефть и газ встречаются в различных сочетаниях.

Залегает нефть в горных породах, называемых коллекторами. Пласт-коллектор — это горная порода, способная вмещать в себе флюиды, т. е. подвижные вещества (это могут быть нефть, газ, вода). Упрощенно коллектор можно представить как очень твердую и плотную губку, в порах которой и содержится нефть.

Природный газ

Природный газ является близким родственником нефти. Состоит он в большей части из метана с примесями более тяжелых углеводородов (этана, пропана, бутана). В естественных природных условиях он также часто содержит примеси других газов (гелия, азота, сероводорода, углекислого газа).

Типичный состав природного газа:

Углеводороды:

- метан — 70–98%,
- этан — 1–10%,
- пропан — до 5%,
- бутан — до 2%,
- пентан — до 1%,
- гексан — до 0,5%.

Примеси:

- азот — до 15%,
- гелий — до 5%,
- углекислый газ — до 1%,
- сероводород — менее 0,1%.

Природный газ исключительно широко распространен в недрах земли. Его можно встретить в толще земной коры на глубине от нескольких сантиметров до 8 километров. Так же как и нефть, природный газ в процессе миграции в земной коре попадает в ловушки (проницаемые пласты ограниченные непроницаемой толщей пород), в результате чего формируются газовые месторождения.

Природный (углеводородный) газ — частый спутник нефтяных месторождений. Обычно он содержится в нефти в растворенном виде, а в некоторых случаях скапливается в верхней части месторождений, образуя так называемую газовую шапку. В течение длительного времени газ, выделяющийся при добыче нефти и называемый попутным газом, был нежелательной составляющей процесса добычи. Чаще всего его просто сжигали в факелах.

НЕФТЕДОБЫВАЮЩИЕ ПРЕДПРИЯТИЯ РОССИИ

Согласно данным Минэнерго России, на начало 2019 года добычу нефти и газового конденсата на территории России осуществляют 288 организаций, имеющих лицензии на право пользования недрами, из них 117 входят в структуру вертикально-интегрированных компаний (ВИНК). Остальные компании осуществляют самостоятельную добычу нефти. На условиях соглашений о разделе продукции в России работают 3 компании. Государственным балансом запасов полезных ископаемых Российской Федерации учитывается 2985 месторождений с запасами нефти, в том числе 2427 нефтяных и 558 комплексных (нефтегазовых, газонефтяных и нефтегазоконденсатных) (табл. 2.1).

Таблица 2.1. Основные месторождения добычи нефти России

№ на карте	Регион РФ	Недропользователь, месторождение	Тип
1	Астраханская область	Великое, Прикаспийский НГБ	Нефтяное
2	Каспийское море	Им. В. Филановского, Северо-Кавказско-Мангышлакский НГБ	Нефтяное
3	Оренбургская область	Оренбургское, Волго-Уральский НГБ	Нефтегазоконденсатное
4	Республика Татарстан, Самарская область	Ромашкинское, Волго-Уральский НГБ	Нефтяное

Таблица 2.1 (окончание)

№ на карте	Регион РФ	Недропользователь, месторождение	Тип
5	Республика Башкортостан, Удмуртская Республика	Арланское, Волго-Уральский НГБ	Нефтяное
6	Удмуртская Республика	Чутырско-Киенгопское, Волго-Уральский НГБ	Газонефтяное
7	Республика Коми	Усинское, Тимано-Печорский НГБ Ярегское, Тимано-Печорский НГБ	Нефтяное Нефтяное
8	Ненецкий АО	Харьягинское, Тимано-Печорский НГБ Имени Романа Требса, Тимано-Печорский НГБ	Нефтегазоконденсатное Нефтяное
9	Тюменская область	Усть-Тегусское, Западно-Сибирский НГБ	Нефтяное
10	Печорское море	Долгинское, Тимано-Печорский НГБ Приразломное, Тимано-Печорский НГБ Медынское (море), Тимано-Печорский НГБ	Нефтяное Нефтяное Нефтяное
11	Ханты-Мансийский АО	Приразломное, Западно-Сибирский НГБ Приобское, Западно-Сибирский НГБ Самотлорское, Западно-Сибирский НГБ Красноленинское, Западно-Сибирский НГБ Тевлинско-Русскинское, Западно-Сибирский НГБ Имилорское, Западно-Сибирский НГБ Салымское, Западно-Сибирский НГБ Федоровское, Западно-Сибирский НГБ Рогожниковское, Западно-Сибирский НГБ Имени В. И. Шпильмана (Северо-Рогожниковское), Западно-Сибирский НГБ	Нефтяное Нефтяное Нефтегазоконденсатное Нефтегазоконденсатное Нефтяное Нефтяное Нефтяное Нефтегазоконденсатное Нефтяное Нефтяное
12	Ямало-Ненецкий АО	Русское, Западно-Сибирский НГБ Северо-Комсомольское, Западно-Сибирский НГБ Уренгойское, Западно-Сибирский НГБ Новопортовское, Западно-Сибирский НГБ Восточно-Мессояхское, Западно-Сибирский НГБ	Нефтегазоконденсатное Нефтегазоконденсатное Нефтегазоконденсатное Нефтегазоконденсатное Нефтегазоконденсатное
13	Карское море	Победа, Западно-Сибирский НГБ	Нефтяное
14	Красноярский край	Ванкорское, Западно-Сибирский НГБ Тагульское, Западно-Сибирский НГБ Куюмбинское, Лено-Тунгусский НГБ Юрубчено-Тохомское, Лено-Тунгусский НГБ	Нефтегазоконденсатное Нефтегазоконденсатное Нефтегазоконденсатное Нефтегазоконденсатное
15	Иркутская область	Верхнечонское, Лено-Тунгусский НГБ Имени Савостьянова, Лено-Тунгусский НГБ	Нефтегазоконденсатное Нефтегазоконденсатное
16	Республика Саха (Якутия)	Среднеботуобинское, Лено-Тунгусский НГБ Талаканское, Лено-Тунгусский НГБ Чаяндинское, Лено-Тунгусский НГБ	Нефтегазоконденсатное Нефтегазоконденсатное Нефтегазоконденсатное
17	Охотское море	Пильтун-Астохское, Охотский НГБ Аркутун-Дагинское, Охотский НГБ Чайво, Охотский НГБ	Нефтегазоконденсатное Нефтегазоконденсатное Нефтегазоконденсатное

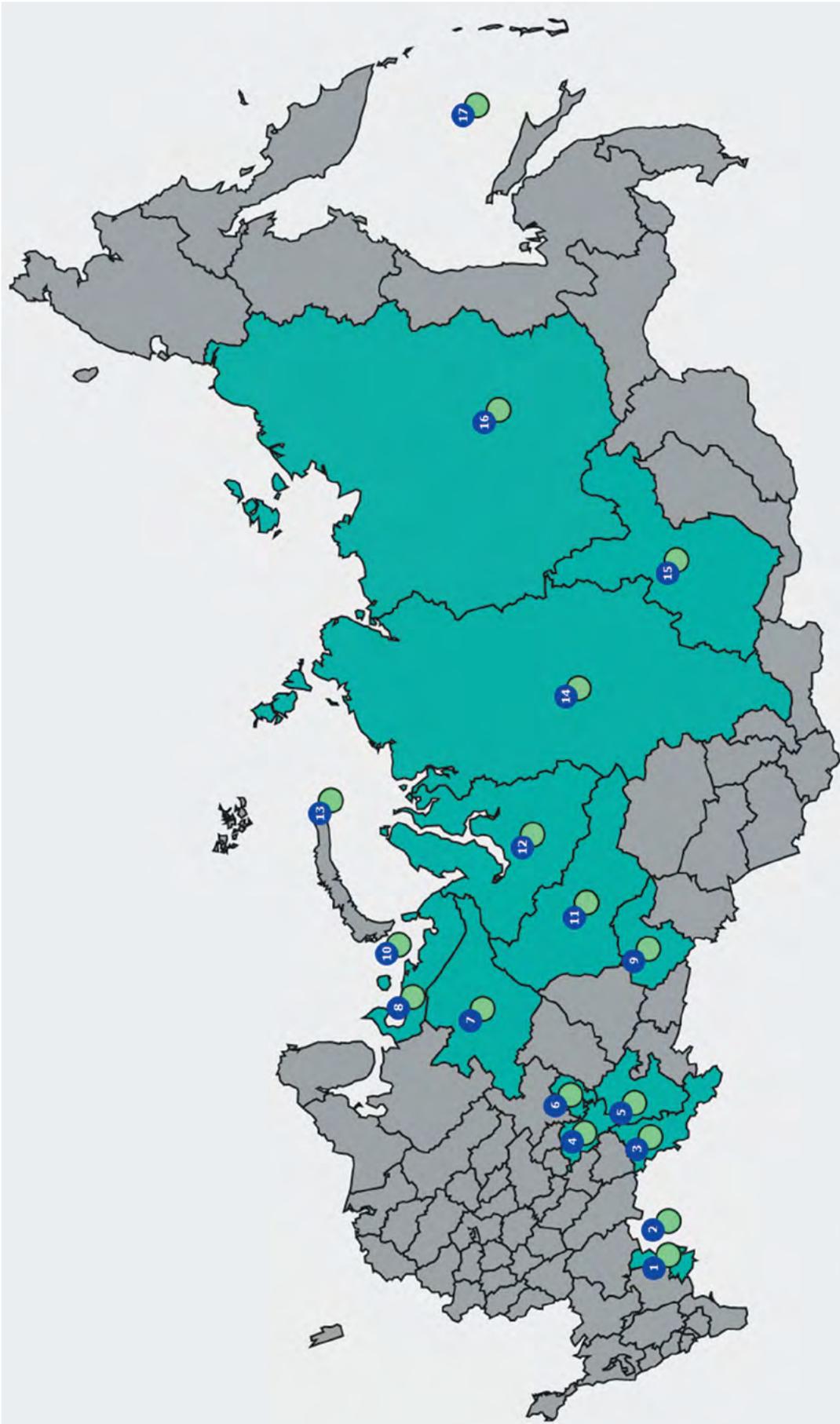


Рис. 2.1. Карта-схема расположения основных месторождений нефти Российской Федерации

ГАЗОДОБЫВАЮЩИЕ ПРЕДПРИЯТИЯ РОССИИ

Согласно данным Минэнерго России, на начало 2019 года добычу природного и попутного нефтяного газа (далее ПНГ) на территории страны осуществляют 251 добывающее предприятие, в том числе 80 входящих в состав вертикально-интегрированных нефтяных холдингов (ВИНК), 15 дочерних компаний в составе Газпром, 9 структурных подразделений НОВАТЭК, 144 независимые нефтегазодобывающие компании и 3 предприятия, работающие на условиях соглашений о разделе продукции (операторы СРП). Запасы свободного газа России учтены Государственным балансом запасов Российской Федерации в 949 месторождениях (714 находятся в распределенном фонде недр).

Таблица 2.2. Основные месторождения добычи газа России

№ на карте	Регион РФ	Недропользователь, месторождение	Тип месторождения
1	Краснодарский край	Анастасиево-Троицкое	Нефтегазоконденсатное
2	Астраханская область	Астраханское, Прикаспийский НГБ Центрально-Астраханское, Прикаспийский НГБ	Газоконденсатное
3	Каспийское море	Хвалынское, Северо-Кавказско-Мангышлакский НГБ Имени Ю. С. Кувыкина (Сарматское), Северо-Кавказско-Мангышлакский НГБ	Нефтегазоконденсатное
4	Оренбургская обл.	Оренбургское, Волго-Уральский НГБ	Нефтегазоконденсатное
5	Баренцево море	Штокмановское, Восточно-Баренцевский НГБ Ледовое, Восточно-Баренцевский НГБ	Газоконденсатное
6	Ямало-Ненецкий АО	Ямбургское, Западно-Сибирский НГБ	Нефтегазоконденсатное
		Заполярье, Западно-Сибирский НГБ	
		Бованенковское, Западно-Сибирский НГБ	
		Медвежье, Западно-Сибирский НГБ	
		Песцовое, Западно-Сибирский НГБ	
		Харасавэйское, Западно-Сибирский НГБ	Газоконденсатное
		Салмановское (Утреннее), Западно-Сибирский НГБ	Нефтегазоконденсатное
		Северо-Тамбейское, Западно-Сибирский НГБ	Газоконденсатное
		Малыгинское, Западно-Сибирский НГБ	
		Тасийское, Западно-Сибирский НГБ	
		Восточно-Уренгойское, Ново-Уренгойское	
		Береговое, Пырейное, Хадырьяхинское	
Харампурское			
Уренгойское, Западно-Сибирский НГБ			
Северо-Уренгойское, Западно-Сибирский НГБ	Нефтегазоконденсатное		
Южно-Русское, Западно-Сибирский НГБ			
Западно-Сибирский НГБ			
7	Карское море	Крузенштернское, Западно-Сибирский НГБ	Газоконденсатное
		Каменномысское море, Западно-Сибирский НГБ	Газовое
		Северо-Каменномысское, Западно-Сибирский НГБ	Газоконденсатное
		Семаковское, Западно-Сибирский НГБ	Газовое
		Русановское, Западно-Сибирский НГБ	Газоконденсатное
		Ленинградское, Западно-Сибирский НГБ	
		Южно-Тамбейское, Западно-Сибирский НГБ	
Юрхаровское, Западно-Сибирский НГБ	Нефтегазоконденсатное		
8	Красноярский край	Ванкорское	Нефтегазоконденсатное
9	Иркутская область	Ковыктинское, Лено-Тунгусский НГБ	Газоконденсатное
		Ангаро-Ленское, Лено-Тунгусский НГБ	Нефтегазоконденсатное
10	Респ. Саха (Якутия)	Чаяндинское, Лено-Тунгусский НГБ	Нефтегазоконденсатное
11	Охотское море	Южно-Кириновское, Охотский НГБ	Нефтегазоконденсатное
		Лунское, Охотский НГБ	
		Чайво, Охотский НГБ	

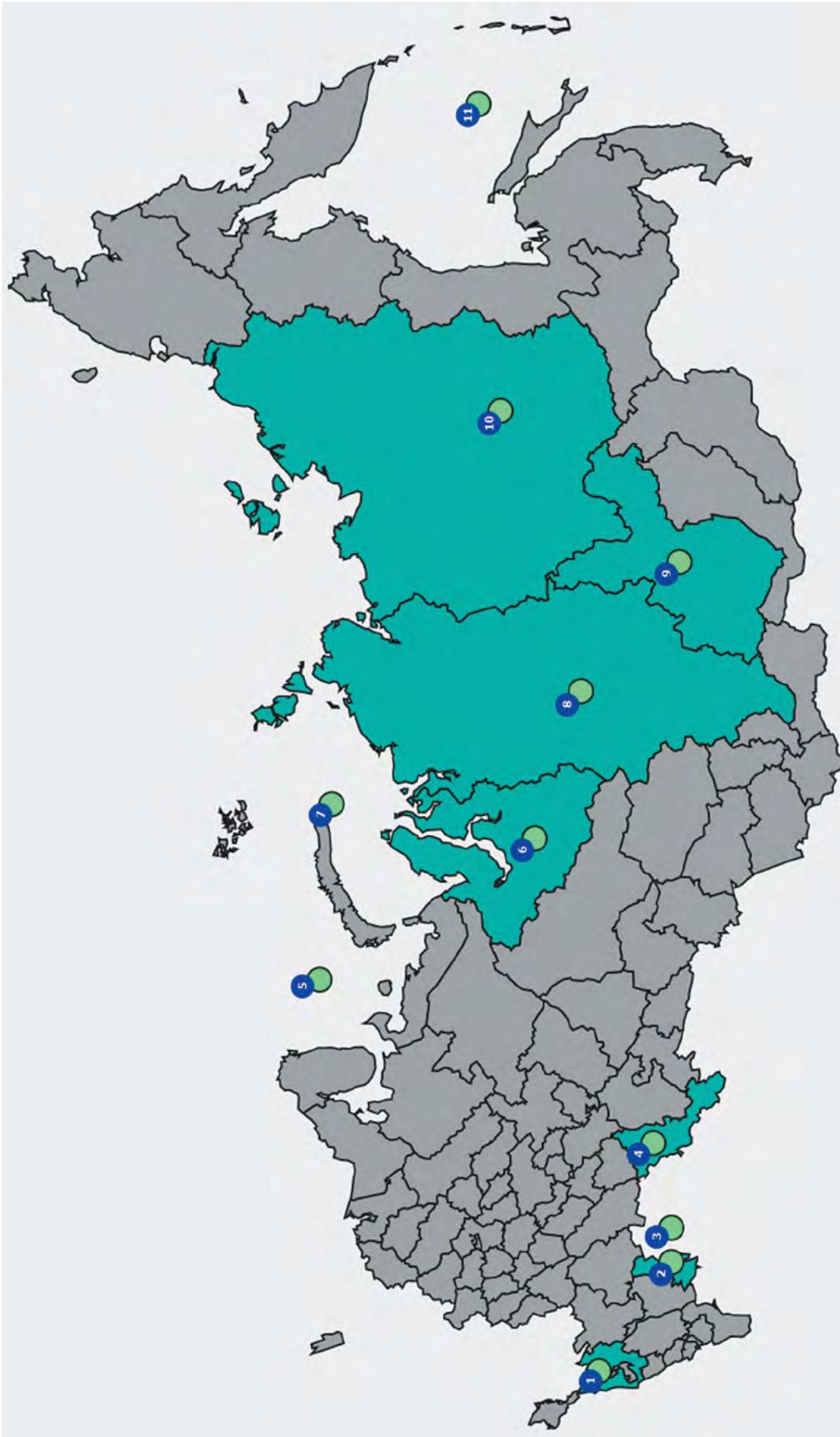


Рис. 2.2. Карта-схема расположения основных месторождений газа Российской Федерации

ИСТОРИЯ ЗАРОЖДЕНИЯ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Зарождение нефтедобывающей промышленности в мире

Известно, что люди использовали сырую нефть в быту с очень древних времен. В древности маслянистую жидкость, просачивающуюся из горных пород, различные народы именovali по-разному.

В государстве Мидия, существовавшем в VII–VI вв. до н. э. на части территорий современных Ирана, Азербайджана, Ирака, Сирии и Турции, вязкую жидкость называли словом «нафата», от которого, предположительно, и произошло современное слово «нефть». В Персидском государстве словом «нефт» обозначались колодцы, из которых добывали нефть. Древние греки слова «нафата» и «нефт» превратили в греческое слово «нафта».

Точно определить время, когда люди впервые стали использовать природную нефть и ее производные (природные битумы и асфальты), невозможно. Археологических данных об использовании нефти в те далекие времена до настоящего времени не обнаружены. Можно только предполагать, что впервые человечество познакомилось с этой жидкостью не ранее, чем 35–40 тысячелетий назад, когда люди стали использовать огонь. Но есть данные, что в древности в индейских племенах вязкие асфальты люди употребляли в качестве скрепляющего материала для укрепления наконечников стрел и копий, а также как водонепроницаемый материал — для обмазывания плетеных сосудов и лодок.

Ситуация начала меняться с IV–III тысячелетия до н. э., когда стали возникать и расширять свои границы первые города и государства. В этот исторический период «каменное масло» и «каменная смола» стали уже находить более широкое применение: в медицине, для освещения и отопления жилищ, в строительстве и судостроении.

Зарождение газодобывающей промышленности в мире

Первые упоминания о природном газе, так же как и нефти, своими корнями уходят в глубокую древность. Много столетий назад люди обратили внимание на вырывающиеся из-под земли языки пламени. Тогда они думали, что их порождают могущественные духи или божества, и поэтому горящие факелы газа в те далекие времена называли «священными», «вечными», «неугасаемыми» огнями. Использовались также такие выражения, как «подземные ветры», «горящие горы», «огненные фонтаны» и др. Такие упоминания о священных огнях были в самых разных местах нашей планеты. Из дошедших до нас легенд и сказаний известно, что еще до нашей эры такие огни горели на острове Ява, на берегу озера Эрн в Северной Америке, в Индонезии, Персии, Италии, Франции.

Упоминания о «естественном огне» в Италии встречаются у персидского историка и астронома Бероса, жившего в III в. до н. э. Позднее, в 96–55 гг. до н. э., римский поэт Лукреций Кар пишет о «рождении огня на волнах» и о «горящей земле». Примерно об этом же пишет географ и историк Страбон, живший в 64–23 гг. до н. э.

Горящие газовые факелы наблюдались и на территории Франции в районе Гренобля. Их впервые описал Святой Августин (354–430) в своей книге «Город Бога». Более чем через тысячу лет об этом пишет Тициан (1489–1576), называя горящие факелы «пятым чудом природы», а спустя столетие, в 1525 г., «горящими фонтанами» Гренобля восхищается и историк Жером Монтез д’Асти.

Природный газ появляется на поверхности в виде пузырьков в водоемах и на болотах. Существуют и фонтанные выбросы, когда вместе с газом извергаются вода и горная порода. При этом на поверхности образуются грязевые конусы (грязевые «вулканы») высотой в несколько сотен метров. Подобные конусы с периодическим выбросом газов встречаются на Апшеронском полуострове: Тоурагай (высота 300 м) и Кянизадаг (490 м), на Небит-Даге (Туркмения), на севере Ирана, в Мексике, Румынии, США и других странах.

Происхождение негаснущего голубого пламени оставалось загадкой для живших в древности людей. Знания их были недостаточными для того, чтобы раскрыть тайну появления огня, поэтому в древности люди к «неведомо отчего» горящим без дыма и копоти огням относились со страхом и почтением и поклонялись им как божеству. Человек еще с первобытных времен поклонялся огню как благодатной, хотя и опасной стихии. Почти во всех религиях до сих пор сохранились следы культа огня в виде пламени жертвенника или хотя бы свечи, лампы или светильника, горящих перед изображением божества. Огонь почитали скифы и готы, индийцы и кельты. Античные философы считали его «душою природы» (*anima naturae*).

Природный газ, как и нефть, с древних времен использовался человеком в местах его естественного выхода на поверхность. Аристотель (384–322) говорит об использовании природного огня персами для бытовых целей.

Возможности добычи и использования природного газа впервые открыла миру древняя китайская цивилизация.

Интересно, что уже в те далекие времена в Китае с целью безопасности умели контролировать горение газа. В дошедших до нас источниках довольно подробно описываются сложные приспособления для контроля за горением газа. В них говорится, что из «огненных колодцев» газ попадал в большую деревянную камеру, напоминающую конусообразную бочку, врытую в землю на глубину около 3 м. По подземной трубе в камеру подавался воздух, от камеры отводились трубы к коническим бочкам меньшего размера, которые устанавливались уже на поверхности. Через отверстия, которые можно было открывать и закрывать в бочки подавался воздух, позволявший регулировать силу огня. Смешивание газа с воздухом и регулирование его с помощью заслонки давали равномерное пламя высотой до 1,6 см, которое использовали для обогрева и освещения жилищ, выпарки соли на древних солеварнях и даже для приготовления пищи

История нефтедобывающей промышленности в России

В ходе раскопок, которые в 1951 г. велись на Керченском полуострове в Крыму и на соседнем Таманском полуострове, ученые установили, что в античности появился новый способ добычи «горного масла» с помощью неглубоких ям-копанок. Ямы, обнаруженные на Таманском полуострове, и найденная в Крыму на метровой глубине глиняная амфора с нефтью, закрытая пробкой, возраст которой составлял около 2 тысяч лет, позволили ученым восстановить процесс добычи нефти, который состоял в следующем. В вырытые ямы, быстро наполнявшиеся нефтью, опускали куски шерсти и войлока, которые затем отжимали в сосуды. Крым и Тамань в те времена и позже были одними из известных районов нефтедобычи, о чем свидетельствует их роль в производстве «греческого огня». Ямы для добычи нефти были обнаружены и в других нефтеносных районах — в Иране, Ираке, а также в Ферганской долине, где были найдены глиняные черпаки, которыми нефть извлекали из ям и переливали в кувшины.

Добывалась нефть и на территории современного Азербайджана, особенно на Апшеронском полуострове, где, по свидетельству путешественника Марко Поло (1272 г.), находился источник масла, которым можно загрузить «до сотни верблюдов».

История газодобывающей промышленности в России

Самые древние упоминания о «вечном огне» на бывшей территории царской России относятся к V–IV вв. до н. э. В них говорится о районе нынешнего Баку (в разных древних источниках мы находим сообщения о месторождениях под названиями Дербентское, Хазарское, Хвалынское и Гирканское), где, по крайней мере, с IV в. до н. э. были известны нефтяные и газовые месторождения. Факелы горящих газов на Апшеронском полуострове и на Дагестанском побережье Каспийского моря служили маяками для плававших там

судов. В частности, о вечном священном огне в Баку известно из записей греческого врача Ктесия, жившего в V–IV вв. до н. э. Арабский географ аль-Масуди, посетивший этот район в 915 г. н. э., описывает «...огненную колонну, достигающую большой высоты». Значительно позже (1466 г.) в своем дневнике «Хождение за три моря» тверской купец Афанасий Никитин описывает свои впечатления о посещении сначала Дербента, затем Баку, где он увидел негаснущие огни горящих факелов природного газа. Недалеко от Баку, в селении Сураханы, до наших дней сохранился храм Атешгях, в котором горит «неугасаемый» огонь. Строители храма умело использовали еще непознанные силы природы. От мест выхода природного газа они прокладывали глиняные трубы к четырем углам храмовой крыши и поджигали выходящий оттуда газ, привлекая тысячи паломников.

ЦИКЛЫ РАЗВИТИЯ НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

С развитием нефтяной отрасли закономерно изменялись применяемые технологии добычи, условия труда, структура себестоимости добычи, рентабельность добычи и использования нефти. Историю развития нефтедобычи можно условно разделить на четыре цикла, краткая характеристика которых приведена в табл. 2.3. Подробное описание каждого из циклов развития технологий добычи нефти приведено в последующих разделах.

Таблица 2.3. Характеристика технологических циклов развития нефтедобывающей промышленности

Период	Цикл	Причины, побудившие переход на новый цикл развития	Характеристика технологий добычи
III в. до н. э. — конец XVII в. н. э.	Первый (непромышленная добыча)	Использование нефти в военном деле, строительстве, медицине, для отопления и освещения жилищ	Сбор нефти и битумов с поверхности водоемов, в неглубоких впадинах, добыча с помощью рытья колодцев
XVIII в. — начало XIX в.	Второй (эпоха промышленных революций)	Изобретение парового двигателя, переход морских судов с использования угля на мазут	Добыча нефти из колодцев при помощи ручной и конной тяги. Начало бурения скважин на глубину до 60–70 м при помощи составных буров и буровой вышки с использованием ручного труда при помощи колеса. Зарождение ударного и штангового бурения
Вторая половина XIX — начало XX в.	Третий (эпоха нефтяного бума)	Изобретение Игнатием Лукасевичем керосиновой лампы и разработка способа перегонки нефти для получения керосина. Изобретение и создание двигателя внутреннего сгорания и дизельного двигателя. Зарождение автомобилестроения, авиации	Использование вращательного бурения скважин, добыча из которых вначале велась при помощи ручных насосов. Постепенный переход на механизированную добычу нефти при помощи паровых двигателей и компрессоров. Использование обсадных труб. Строительство первых нефтепроводов
Середина XX — XXI в.	Четвертый (эпоха глобализации)	Усиление позиций нефтедобывающей промышленности на мировых рынках. Глобализация нефтяной отрасли	Бурение глубоких и сверхглубоких скважин с горизонтальными отводами с использованием турбо- и пневмобурения. Добыча нефти при помощи насосов, создание различных способов увеличения нефтеотдачи пластов. Развитие добычи на шельфе

Таблица 2.4. Основные этапы циклов развития нефтедобывающей промышленности

Цикл	Научно-технический этап	Технико-экономический этап	Экономическо-социальный этап	Социально-регуляторный этап
Первый (непромышленная добыча)	Сбор нефти на поверхности водоемов, в неглубоких впадинах, добыча с помощью рытья колодцев	Использование нефти в военном деле, строительстве, медицине, для отопления и освещения жилищ	Зарождение промышленных революций	Способы добычи нефти уже не удовлетворяли потребности промышленности и населения
Второй (эпоха промышленных революций)	Изобретение паровых двигателей	Начало бурения скважин на глубину до 60–70 м	Бурное развитие торговли, транспорта и крупного производства	Способы добычи нефти уже не удовлетворяли потребности промышленности и населения крупных городов
Третий (эпоха нефтяного бума)	Изобретение керосиновой лампы, двигателя внутреннего сгорания и дизельного двигателя	Использование вращательного бурения скважин	Переход промышленности с угля на нефтяное топливо	Способы добычи нефти уже не удовлетворяли потребности промышленности и населения крупных городов
Четвертый (эпоха глобализации)	Добыча нефти при помощи насосов, создание различных способов увеличения нефтеотдачи пластов	Бурение глубоких и сверхглубоких скважин с горизонтальными отводами с использованием турбо- и пневмобурения	Ужесточение природоохранного законодательства, отказ от неэкологических технологий	Переход на удаленное управление процессом добычи

Первый технологический цикл

Причины, побуждавшие добывать нефть и ее производные (битум, асфальт) в древности главным образом были связаны с ее использованием в строительстве, медицине, в военном деле и реже для отопления и освещения жилищ. Вплоть до конца Средневековья нефть не добывалась, а извлекалась из природных углублений вблизи мест ее естественных выходов. Обычно это были озера, заполненные битумом, асфальтом, или просто нефть на поверхности обычных водоемов.

Следует отметить, что прогресс в использовании и добыче нефти шел быстрее там, где больше было ее естественных выходов на поверхность земли.

Второй технологический цикл

В начале XVIII в. в Европе произошли промышленные революции, что повлекло бурное развитие торговли, транспорта и крупного производства. В конце XVII — начале XVIII в. были созданы первые паровые двигатели, предназначенные для откачки воды из шахт (раньше для этой цели в некоторых шахтах использовали до 500 лошадей).

Наступившая индустриальная эра потребовала дополнительных источников энергии, а интерес в этот период к нефти был сравнительно невелик. До XVIII в. проблема решалась за счет традиционных источников энергии — дров и древесного угля. Однако европейцы столкнулись с постоянно растущим дефицитом этих природных запасов. За долгий период средневековья количество европейских лесов значительно сократилось, что ускорило наступление нефтяной и угольной эры в энергетике.

С течением времени потребление нефти в разных странах мира стало расти, а применявшийся в то время колодезный способ добычи нефти уже не удовлетворял потребности промышленности и населения крупных городов. Ученые и изобретатели всего мира стали искать новые более прогрессивные технологии добычи нефти, основанные на бурении глубоких скважин. Промышленное бурение скважин на нефть в Европе началось только в XIX в., после того как в 1852 г. польский провизор Игнатий Лукасевич разработал способ перегонки нефти и изобрел керосиновую лампу. После этого события нефтедобыча стала резко возрастать.

Третий технологический цикл

Особенно бурное развитие нефтедобыча получила после изобретения Лукасевичем керосиновой лампы и способа получения керосина для нее. Нефть стала товаром, потребность в ней резко возросла, что повлекло рост цен на нее. Крупные центры нефтедобычи стали привлекать к себе все новых и новых претендентов на богатство. В середине XIX в. таких центров было два: Апшеронский полуостров и американская Пенсильвания. Именно там возникли первые предприятия, из которых позже выросли современные крупные нефтяные компании.

Мощный толчок к овладению ресурсами нефти дала стремительная индустриализация ведущих капиталистических держав. Именно в этот период были совершены многие крупнейшие открытия в науке и технике. В 1860 г. бельгийцем Этьеном Ленуар был изобретен первый в мире двигатель внутреннего сгорания, работавший на бензине, а в 1897 г. Рудольф Дизель изобрел дизельный двигатель, для работы которого также требовалось топливо. В 1886 г. Готлиб Даймлер и Карл Бенц построили первые автомобили с двигателями внутреннего сгорания.

Еще одна революция, связанная с использованием нефти, произошла в Англии. Адмирал Джон Фишер и морской министр Уинстон Черчилль убедили парламент перевести с угля на нефтяное топливо (мазут) военно-морской флот, который составлял основу могущества Британской империи. Для того чтобы иметь надежный источник нефтяного топлива, Черчилль настоял на покупке контрольного пакета акций британской компании, имевшей концессию на добычу нефти в Персии. Уже накануне войны, в 1913 г., 30% военного флота Великобритании работало на нефтяном топливе.

Четвертый технологический цикл

Самым эффективным способом увеличения нефтяных ресурсов в мире в первой половине прошлого века считалось глубокое бурение. Необходимость бурения сверхглубоких скважин была вызвана поиском нефтегазоносных горизонтов на больших глубинах.

В настоящее время бурение сверхглубоких скважин производят с использованием забойных двигателей, а для того, чтобы снизить вес колонны, бурильные трубы изготавливают из легкого, но прочного алюминиевого сплава.

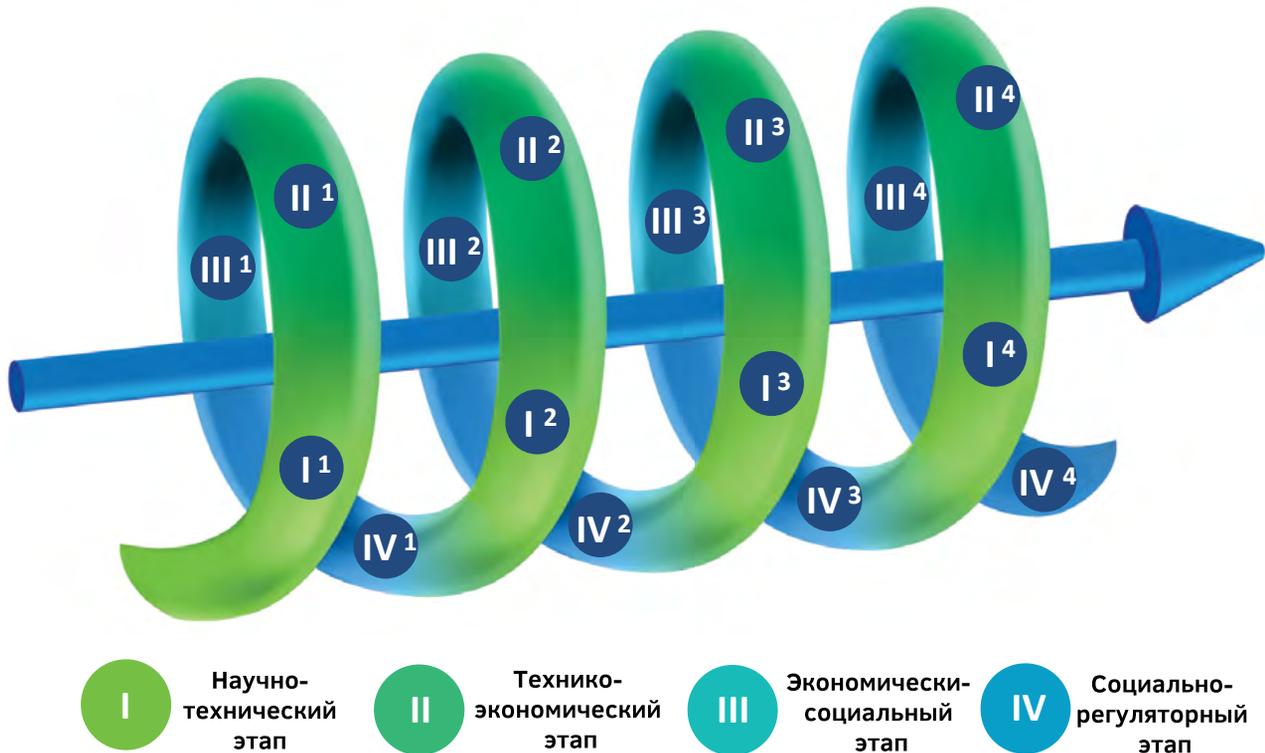
Весьма важное значение для повышения мировой нефтедобычи в XX в. приобрело освоение шельфовых месторождений нефти (нефтяные ресурсы, скрытые под дном морей и океанов).

С ростом технического оснащения нефтедобывающей отрасли и расширением объемов разведочного бурения, использование нефтяных запасов, хранящихся под дном озер, морей и океанов, приобретало все большую актуальность. До середины 60-х гг. в 16 водных акваториях были обнаружены месторождения нефти и газа и в 40 акваториях, принадлежащих 65 странам, проводились поисковые и разведочные работы на нефть и газ. По мере развития шельфовой добычи углеводородов совершенствовались и способы строительства скважин.

Эволюция технологий добычи нефти

Стоит отметить, что каждый цикл обусловлен определенным этапом, который дает новый толчок к развитию технологий. Последовательное прохождение всех этапов приводит к завершению цикла развития отрасли, после чего цикл повторяется (рис. 2.3).

Ресурсоэффективность в рамках исторического развития отраслей промышленности рассматривается как важнейший фундаментальный концепт перехода технологического развития на новый уровень. При этом метод исследования сосредоточен на изучении реакции отрасли как целого на изменяющиеся условия, без подробного описания механизма работы и внутреннего устройства той или иной технологии, так как в рамках поставленной задачи это не является первостепенным объектом изучения.



I¹ — сбор нефти с поверхности водоемов, в неглубоких впадинах, добыча с помощью рытья колодцев

II¹ — использование нефти в военном деле, строительстве, медицине, для отопления и освещения жилищ

III¹ — зарождение промышленных революций

IV¹ — способы добычи нефти уже не удовлетворяли потребности промышленности и населения

I² — изобретение паровых двигателей

II² — начало бурения скважин на глубину до 60–70 м

III² — бурное развитие торговли, транспорта и крупного производства

IV² — способы добычи нефти уже не удовлетворяли потребности промышленности и населения крупных городов

I³ — изобретение керосиновой лампы, двигателя внутреннего сгорания и дизельного двигателя

II³ — использование вращательного бурения скважин

III³ — переход промышленности с угля на нефтяное топливо

IV³ — способы добычи нефти уже не удовлетворяли потребности промышленности и населения крупных городов

I⁴ — добыча нефти при помощи насосов, создание различных способов увеличения нефтеотдачи пластов

II⁴ — бурение глубоких и сверхглубоких скважин с горизонтальными отводами с использованием турбо- и пневмобурения

III⁴ — ужесточение природоохранного законодательства, отказ от неэкологичных технологий

IV⁴ — переход на удаленное управление процессом добычи

Рис. 2.3. Эволюция технологий добычи нефти

ЦИКЛЫ РАЗВИТИЯ ГАЗОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Первый технологический цикл — до эпохи промышленной добычи газа

Газ впервые был обнаружен в Китае во время бурения скважин для откачки соляных растворов. С этой целью в горных породах методом ударного бурения были сооружены первые бамбуковые скважины. Для этого использовались бронзовые колотушки, а обсадка скважины осуществлялась трубами из бамбука. Порой эти скважины давали только метан, за что были названы «огненными колодцами». Уже за 200 лет до н. э. природный газ там применялся для освещения, отопления и выпаривания соли, однако регулярная добыча и использование газа в Китае начались лишь во II в. н. э., для чего использовалось глубокое бурение скважин. Дошедшие до нас источники свидетельствуют о том, что газ в Китае добывался в провинциях Сычуани, Шэньси и Юньнань. В провинции Сычуань уже в 347 г. н. э. газ поставляли потребителям по бамбуковым трубопроводам на длительные расстояния. Для использования газа китайцы впервые построили трубопроводы. Путешественник и географ Чжан Цюй в своих «Записках о Южной стране» так описывает использование природного газа: «В том месте, где река Бупу сливается с рекой Хуоцзинь, есть огненные колодцы, где по ночам небо сильно светится. Жители этого района получают огонь, поднося к выходам колодцев головешки, взятые из домашних очагов. Поэтому всякий раз там слышался шум, подобный грохотанию грома, а вырывающиеся языки пламени были такими яркими, что освещали всю местность вокруг. Кроме того, люди использовали бамбуковые трубы, сохранявшие огонь и помогающие его перемещению из одного места в другое на расстояние дня пути от колодца. При горении огня не образуется никакой золы, а пламя сияет ослепительно».

В X в. китайцы предвосхитили появление современных цистерн для транспортировки бутана, наливая побочные продукты добычи газа в бамбуковые трубы и отправляя их в другие города, где газ также использовали в качестве топлива.

В 1772–1774 гг. путешественник-натуралист Самуил Готлиб Гмелин в своей книге «Кавказцы 1750–1820 гг.» описал примитивный процесс добычи и использования газа из апшеронских «вечных огней». Об этом он пишет так: «Полуостров Апшерон примечателен по нефтяным ключам, которыми он изобилует... Здесь одно место, называемое Атешга, которое беспрепятственно горит. Ежели вблизи живущие обыватели пожелают, чтобы к вечеру был свет, то вырывают они в земле ямку, втыкают трубку и держат над нею огонь, отчего немедленно загорается выходящий пар подобно свече, без повреждения трубки, и горит до тех пор, пока не погасят, или не выдернут трубки. Жителям сей огонь весьма полезен для обжига извести, потому что там великий претерпевают недостаток в дровах... Таким же образом крестьяне варят себе кушанье».

Однако до открытия светильного газа нигде больше газ не находил практического применения, в отличие от нефти.

Второй технологический цикл — эпоха промышленной добычи газа

Впервые промышленная добыча и использование газа было связано с его искусственным получением из угля. Используя идею Уильяма Мэрдока, немецкий изобретатель Вильгельм Август Лампадиус изготовил в своем жилище небольшую установку по получению светильного газа из каменного угля. Полученный газ он выводил через тонкую трубку на осветительное устройство, которое он разместил на наружной стороне стены своего дома. Позднее таким образом он осветил всю улицу саксонского города Фрайберга, на которой жил, а затем и главную рыночную площадь. Его устройство позволило со временем отключить большинство масляных фонарей, которыми прежде освещался город, и заменить их на газовые фонари. В 1815 г. Лампадиус приступил к усовершенствованию своей установки для

получения светильного газа с тем, чтобы увеличить ее мощность для газового освещения цехов амальгамного завода в городе Хальсбрюке, расположенного недалеко от Фрайберга. В результате там 24 января 1816 г. была введена в действие одна из первых в Европе промышленных установок по производству светильного газа, и с тех пор, как пишет современник, зал и караульное помещение завода освещались «прекрасным газовым светом».

Следует отметить, что первый газ, полученный из угля, при горении выделял копоть. Это заставило искать возможности очистки газа от примесей. В результате Семюэлем Клеггом был спроектирован первый цилиндрический газгольдер, который был построен в Великобритании компанией «Лондон энд Вестминстер Гэс Лайт энд Коул» в 1816 г. В это же время появились счетчики для контроля за расходом газа.

Во второй половине XIX в. потребление горючего газа в промышленности Западной Европы стало быстро расти. Это стало возможно благодаря созданию газогенератора с регенеративной печью, патент на который был выдан в 1861 г. немецкому инженеру Сименсу. Через 20 лет в Англии была сконструирована специальная установка для охлаждения и очистки генераторного газа, благодаря которой его применение значительно расширилось.

Зарождение технологии промышленной добычи природного газа началось после того, как в 1821 г. американский предприниматель Уильям Харт пробурил первую газовую скважину в Пенсильвании и направил газ по трубопроводу в город для освещения улиц и домов. Стало ясно, что одна скважина, требующая лишь небольшого обслуживания, может дать газа гораздо больше, чем целый завод, вырабатывающий искусственный газ из угля и требующий целого большого штата инженерно-технического и рабочего персонала (не считая добычи и доставки угля).

Интерес к природному и попутному нефтяному газу во многом определялся как открытием новых месторождений, так и стремлением предпринимателей на получение дополнительных доходов. Однако далеко не все осознали значение нового источника энергии. Отсюда и отсутствие непостоянного интереса в использовании природного газа.

Все описанные выше случаи были, пожалуй, единственными положительными примерами промышленного использования природного газа в XIX в.

В России зарождение технологии промышленной разработки природного газа связано с разработкой в 1906 г. вблизи Дербента месторождения «Дагестанские Огни». В 1909 г. в Грозном впервые начали утилизировать попутный газ, выделявшийся из нефтяной скважины под собственным давлением. Он был направлен по трубопроводу, длиной около 280 м, в промысловую кочегарку, где сжигался в топках паровых котлов. Газ из скважины отбирался 16 часов в сутки, а в остальные 8 часов он попросту выпускался в атмосферу, так как в это время добыча нефти осуществлялась желонкой.

Третий технологический цикл — современные технологии добычи газа

В начальный период эксплуатации скважины газ выходит на поверхность земли за счет накопленной в недрах земли природной энергии. Однако по мере истощения природной энергии для дальнейшей эксплуатации месторождения требуются дополнительные внешние источники. Для этого в современной практике эксплуатации газовых месторождений используются различные технологии, направленные, с одной стороны, на поддержание пластового давления традиционных месторождений газа, а с другой — на раскрытие потенциала трудноизвлекаемых запасов газа. Исчерпание промышленных запасов природного газа ставит на повестку дня также необходимость эксплуатации месторождений на поздней стадии их отработки.

Применение новых технологий в нефтяной и газовой промышленности коснулось и методов бурения нагнетающих и откачивающих скважин. В сфере нефтегазовой добычи непреложным правилом является более результативная добыча из мест, расположенных возле береговой линии или в море.

В последние годы в некоторых странах проводятся полномасштабные работы по освоению добычи газа из сланцевых месторождений.

Одним из наиболее перспективных направлений развития газовой отрасли является разработка новых технологий для производства, хранения, транспортирования и использования а также создание оборудования для сжижения природного газа (СПГ).

ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ НЕФТЕГАЗОДОБЫЧИ

Добыча нефти

Добычу нефти можно подразделить на несколько этапов: бурение и обустройство скважин, добыча, сбор и транспорт продукции нефтяных скважин, подготовка нефтегазодляной смеси, поддержание пластового давления, методы воздействия на пласт и вспомогательные процессы.

Бурение скважин. Основным процессом данного этапа является бурение скважины — процесс механического разрушения горных пород специальным породоразрушающим инструментом (долотом), удаления разрушенной породы с забоя скважины и ее подъема на поверхность.

В настоящее время подавляющее число скважин бурятся «способом вращательного бурения». Процесс углубления происходит за счет разрушения горной породы породоразрушающим инструментом и своевременной очистки забоя от разрушенной породы. Частицы выбуренной породы (шлам) выносятся на поверхность потоком бурового раствора (промывочная жидкость), закачиваемым через колонну буровых труб, который, попадая через специальные отверстия в долоте на забой скважины, перемешивается разрушенной породой, вынося шлам на поверхность через затрубное пространство. Промывочная жидкость выносит с забоя частички выбуренной породы, охлаждает долото, создает противодействие на пласты, удерживает стенки скважины от обвалов и т. д. Скважины бурят как на суше передвижными буровыми установками, так и на море специализированными буровыми установками. При морском бурении буровые установки монтируются на эстакадах, плавучих буровых платформах или судах.

Системы сбора продукции скважин. Скважина — горнотехническое сооружение, включающее цилиндрическую горную выработку большой протяженности и малого диаметра, обсаженную одной или несколькими зацементированными колоннами труб, соединяющую продуктивные пласты с земной поверхностью, и оснащенную технологическим оборудованием для подъема извлекаемых из недр полезных ископаемых и попутных компонентов, нагнетания в пласт различных агентов, исследований пластов и пластовых флюидов, а также контроля и наблюдения за состоянием недр.

При проектировании и разработке нефтяных месторождений выделяются следующие группы скважин: *эксплуатационные, нагнетательные и специальные.*

Эксплуатационные скважины предназначены для извлечения из залежи нефтегазодляной смеси и сопутствующих компонентов. В зависимости от способа подъема жидкости эксплуатационные скважины подразделяются на фонтанные, газлифтные и насосные.

Подъем жидкости и газа от забоя скважины на поверхность составляет основное содержание процесса эксплуатации скважин. Этот процесс может происходить как за счет природной энергии (фонтанный способ эксплуатации) поступающих к забою скважины жидкости и газа, так и за счет вводимой в скважину энергии с поверхности (газлифтный, насосный способ эксплуатации).

Фонтанирование скважин обычно происходит на вновь открытых месторождениях нефти, когда запас пластовой энергии велик, т. е. давление на забоях скважин достаточно большое,

чтобы преодолеть гидростатическое давление столба жидкости в скважине, противодействие на устье и давление, расходуемое на преодоление трения, связанное с движением этой жидкости.

Различают два вида фонтанирования скважин:

- фонтанирование жидкости, не содержащей пузырьков газа, — артезианское фонтанирование;
- фонтанирование жидкости, содержащей пузырьки газа, облегчающего фонтанирование, — наиболее распространенный способ фонтанирования.

Артезианский способ встречается при добыче нефти редко. Он возможен при полном отсутствии растворенного газа в нефти и при забойном давлении, превышающем гидростатическое давление столба негазированной жидкости в скважине. При наличии растворенного газа в жидкости, который не выделяется благодаря давлению на устье, превышающему давление насыщения, и при давлении на забое, превышающем сумму двух давлений: гидростатического столба негазированной жидкости и давления на устье скважины.

При фонтанировании за счет энергии газа плотность столба нефтегазоводяной смеси в фонтанных трубах мала, поэтому гидростатическое давление столба такой смеси будет меньше. Следовательно, и для фонтанирования скважины потребуется меньшее забойное давление.

Для безопасной эксплуатации нефтедобывающих скважин, в том числе работающих в режиме фонтанной добычи, их оборудуют колонной головкой и фонтанной арматурой, модифицированной в зависимости от способа эксплуатации. Это оборудование позволяет обеспечить герметизацию устья, гарантирует разобщение межтрубного пространства и направление продукции скважин в пункты сбора нефти и газа, а также при необходимости позволяет полностью закрыть скважины под давлением.

Газлифтная добыча нефти — способ эксплуатации нефтяной скважины, при котором подъем нефти на поверхность осуществляют давлением сжатого газа, нагнетаемого в скважину с поверхности.

Газлифтный способ эксплуатации в основном применяется для:

- а) высокодебитных скважин с большими забойными давлениями;
- б) скважин с высокими газовыми факторами и забойными давлениями ниже давления насыщения;
- в) скважин, эксплуатируемых в труднодоступных условиях (например, затопляемость, паводки, болота и др.).

При *насосном способе* эксплуатации нефтяной скважины извлечение жидкости на поверхность происходит за счет использования насосов. Для этого способа эксплуатации могут применяться следующие виды насосов:

- а) штанговые глубинные насосы;
- б) центробежный насос с электроприводом;
- г) диафрагменный насос;
- д) винтовые
- е) и другие.

Нагнетательные скважины предназначены для воздействия на продуктивные пласты путем нагнетания в них воды, газа, пара и других рабочих агентов с целью поддержания пластового давления для продления фонтанного периода эксплуатации или увеличения дебита механизированных добывающих скважин. В соответствии с принятой системой воздействия нагнетательные скважины могут быть законтурными, приконтурными и внутриконтурными.

При использовании законтурных нагнетательных скважин за контуром месторождения бурят нагнетательные скважины, в которые и подаются жидкости. Таким образом, система заводнения направлена на стабилизацию пластового давления. Это дает возможность увеличить нефтеотдачу пласта до 70%. При больших площадях месторождений используют внутриконтурное обводнение.

Внутриконтурное заводнение — более интенсивная система воздействия на залежь нефтегазоводяной смеси, позволяющая сократить сроки выработки запасов и быстро наращивать добычу нефтегазоводяной смеси.

При приконтурном виде заводнения нагнетательные скважины располагают на расстоянии от внешнего контура нефтеносности в пределах водонефтяной зоны залежи. Применяется в основном при той же характеристике залежей, что и законтурное заводнение, но при значительной ширине водонефтяной зоны, а также при плохой гидродинамической связи залежи с законтурной зоной.

Специальные скважины предназначаются для добычи технической воды, сброса промысловых вод, подземного хранения газа, ликвидации открытых фонтанов. К специальным скважинам относят водозаборные и поглощающие скважины:

- а) водозаборные скважины предназначаются для водоснабжения при бурении скважин, а также систем поддержания пластового давления в процессе разработки;
- б) поглощающие скважины предназначены для закачки промысловых вод с разрабатываемых месторождений в поглощающие пласты;

В зависимости от геологических условий нефтяного месторождения бурят различные типы скважин: вертикальная; наклонно-направленная; горизонтальная; многоствольная или многозабойная.

Вертикальная скважина — это скважина, у которой угол отклонения ствола от вертикали не превышает 5° .

Если угол отклонения от вертикали больше 5° , то это уже наклонно-направленная скважина.

Горизонтальной скважиной (или горизонтальным стволом скважины) называют скважину, у которой угол отклонения ствола от вертикали составляет $80\text{--}90^\circ$. Но здесь есть один нюанс. Так как «в природе нет прямых линий» и продуктивные нефтенасыщенные пласты залегают в недрах земли, как правило, с некоторым наклоном, а часто с довольно крутым наклоном, то на практике получается, что нет никакого смысла бурить горизонтальную скважину под углом, приблизительно равным 90° . Логичнее пробурить ствол скважины вдоль пласта по наиболее оптимальной траектории. Поэтому в более широком смысле под горизонтальной скважиной понимают скважину, имеющую протяженную фильтровую зону — ствол, пробуренный преимущественно вдоль напластования целевого пласта в определенном азимутальном направлении.

Скважины с двумя и более стволами называют многоствольными (многозабойными).

Подготовка нефти. Продукцией нефтяных скважин на начальной стадии освоения месторождения являются нефтегазоводяная жидкость и попутный нефтяной газ (нефтяной газ). По мере увеличения срока разработки месторождения нефтегазоводяная жидкость все больше обводняется минерализованной, в основном хлористыми солями, водой. Вместе с нефтегазоводяной жидкостью из скважин на поверхность выносятся и механические примеси. Их количество в общей массе добываемой нефтегазоводяной жидкости незначительно — в среднем не более 0,1 масс. %. В добываемой продукции также содержатся и такие вещества, как неорганические соли (например, хлорид натрия), сероводород и другие вещества, приводящие к коррозионному износу оборудования с последующими отрицательными технологическими, экономическими и экологическими последствиями.

В связи с этим в процессе сбора, транспорта и подготовки нефтегазоводяной жидкости на промыслах применяют технологии по снижению примесей в нефтегазоводяной жидкости. Технологии разделения продукции нефтяных скважин направлены на получение составляющих фаз: обезвоженную, обессоленную и стабилизированную нефть, минерализованную воду и нефтяного газа. При этом каждая из фаз должна отвечать отраслевым требованиям.

Обезвоженная, обессоленная и стабилизированная нефть после завершения окончательного контроля поступает в резервуары нефти и затем на головную насосную станцию магистрального нефтепровода.

Поддержание пластового давления. На сегодня в нефтяной промышленности для повышения нефтеотдачи пластов используются мероприятия по поддержанию пластового давления (ППД). Система ППД представляет собой комплекс технологического оборудования, необходимый для подготовки, транспортировки, закачки рабочего агента в пласт нефтяного месторождения с целью поддержания пластового давления и достижения максимальных показателей отбора нефтегазовой жидкости из пласта.

Система ППД включает в себя следующие технологические узлы:

- а) систему нагнетательных скважин;
- б) систему трубопроводов и распределительных блоков (ВРБ);
- в) станции по закачке агента (БКНС), а также оборудование для подготовки агента для закачки в пласт;
- г) система водозаборных сооружений.

Методы воздействия на пласт. Тепловые методы воздействия на пласт — это методы интенсификации притока нефти и повышения продуктивности эксплуатационных скважин, основанные на искусственном увеличении температуры в их стволе и призабойной зоне. Тепловые методы применяются в основном при добыче высоковязких парафинистых и смолистых нефтей.

Прогрев приводит к разжижению нефти, расплавлению парафина и смолистых веществ, осевших в процессе эксплуатации скважин на стенках, подъемных трубах и в призабойной зоне.

Вспомогательные процессы

Энергоснабжение. Потребление и генерация электро- и тепловой энергии являются одним из важнейших аспектов при добыче нефтегазовой смеси.

Наиболее часто в качестве топлива для электростанции на нефтяном месторождении используется попутно добываемый нефтяной газ. ПНГ используется для выработки энергии на газотурбинных и газопоршневых станциях. Эффективность этого способа достаточно высока. Неподготовленный «жирный» ПНГ также могут использовать в котельных.

Готовой продукцией промышленных энергетических систем являются тепло и энергия, необходимые для осуществления процессов добычи.

Энергия обычно генерируется в газовых турбинах на промышленной площадке и/или потребляется из электрической сети. Электричество необходимо для работы насосов, компрессоров, систем контроля, клапанов и т. д.

Системы охлаждения. Технологическое оборудование, используемое при добыче нефти, а также рабочие среды требуют охлаждения во избежание аварийных ситуаций или для температурного режима при хранении продукции. Несмотря на происходящие теплообменные процессы между технологическим оборудованием и окружающей средой, остается необходимость дополнительного охлаждения. Дополнительное охлаждение должно быть обеспечено внешней охлаждающей средой: вода и/или воздух.

Широкий диапазон методов используется в целях охлаждения на промышленных площадках. Выбор системы охлаждения зависит от необходимой температуры охлаждения, от мощности охлаждения, риска загрязнения (контур первичного или вторичного охлаждения) и местных условий.

При добыче нефти используют следующие системы охлаждения технологического оборудования:

- а) воздушную систему охлаждения;
- б) прямоточную система охлаждения (природная вода);
- в) циркуляционную систему (оборотная вода, охлаждающая вода);
- г) закрытую систему охлаждения;
- д) систему смешанного типа (гибридную).

В о д о с н а б ж е н и е. На нефтяных месторождениях вода используется для удовлетворения следующих нужд: производственные нужды (бурение нефтяных и нагнетательных скважин, подготовка нефти, подготовка газа, подготовка пластовых вод, подпитка оборотных систем водоснабжения технологических объектов, охлаждение насосов и компрессоров, приготовление реагентов различного назначения, поддержание пластового давления продуктивных горизонтов, профилактический и другие виды ремонта оборудования и аппаратуры, котельные установки и др.); хозяйственно-питьевые нужды, пожаротушения, обеспечения вахтовых поселков, полива зеленых насаждений, территории и др.

Понятие система водоснабжения включает комплекс инженерных сооружений по забору из водоисточников, подготовку и транспортировку воды до потребителя.

Особенностью объектов нефтегазодобычи являются незначительные расходы воды питьевого качества и большие потребные объемы на технологические нужды, нужды заводнения продуктивных пластов и пожаротушения. Для обеспечения водой всех объектов предусматривается строительство системы водоснабжения с комплексом необходимых сооружений, водозаборы для вод из подземных или поверхностных источников, имеющие множество конструктивных решений в зависимости от типа и особенностей водного источника; объекты для доведения воды до качества, предъявляемого к воде различными нормативными документами; насосные станции для перекачки воды от очистных сооружений; распределительные водопроводные сети (различной конструкции и конфигурации) на объектах потребления. Все эти объекты должны предусматривать мероприятия, направленные на охрану, рациональное использование и воспроизводство водных источников. Для сокращения расхода свежей воды предусматриваются системы оборотного водоснабжения и повторного использования вод.

Р е з е р в у а р н ы й п а р к. Нефтегазоводяная жидкость и обезвоженная, обессоленная и стабилизированная нефть хранятся в резервуарах перед первичной подготовкой или подачей на магистральный трубопровод соответственно. По конструктивным особенностям вертикальные цилиндрические резервуары подразделяют на:

- резервуар со стационарной крышей без понтона (РВС);
- резервуар со стационарной крышей с понтоном (РВСП);
- резервуар с плавающей крышей (РВСПК).

Конструкции резервуаров с плавающей крышей. Плавающие крыши резервуаров действуют как барьер, уменьшающий испарения легких углеводородов из переданной на хранение смеси. Резервуары с плавающей крышей в основном используются для хранения обезвоженной, обессоленной и стабилизированной нефти.

Плавающие крыши (ПК) применяются в резервуарах, не имеющих стационарной кровли. Для удобства удаления осадков, выпавших на ПК, последняя должна иметь листовой настил с уклоном к центру. Дождевая вода с ПК отводится через дренажную систему либо из шарнирно-сочлененных, либо из гибких гофрированных труб.

Для подъема на поверхность ПК служит передвижная лестница, конструкция которой обеспечивает горизонтальное расположение ступенек при любом положении крыши. С целью усиления жесткости верхней части корпуса резервуара с плавающей крышей вдоль верхнего пояса монтируют кольцевую площадку для сохранения устойчивости и восприятия ветровой нагрузки. Для удаления паровоздушной смеси и газов из-под плавающей крыши на ней установлен предохранительный клапан.

Добыча газа

Разработка и эксплуатация месторождений предусматривает следующие основные этапы:

- а) строительство скважин;
- б) эксплуатация скважин;
- в) подготовка газа, газового конденсата;
- г) компримирование газа на объекте добычи;
- д) производство сжиженного природного газа.

Эксплуатация месторождения также включает капитальный ремонт скважин, системы поддержания пластового давления и вспомогательные процессы.

Строительство скважин. Строительство скважины является первым этапом добычи газа, целью которого является разработка газовых залежей и подготовка скважины к эксплуатации. Строительство газовых скважин осуществляется на суше и в море.

В цикл строительства скважины входят:

- а) подготовительные работы;
- б) монтаж вышки и оборудования;
- в) подготовка к бурению;
- г) процесс бурения;
- д) крепление скважины обсадными трубами и ее тампонаж;
- е) освоение скважины.

Эксплуатация скважин. Эксплуатация газовых скважин является вторым этапом, следующим за этапом строительства месторождений. Целью этой стадии является извлечение газа из пласта и поднятие его на поверхность месторождения.

На этом этапе происходит движение газа от забоев скважины до их устья на поверхности. Продукция газовой скважины — это природный газ с парами тяжелых углеводородов и воды, капельная вода, нестабильный углеводородный конденсат, мехпримеси.

Технология эксплуатации скважин состоит: в пуске и остановке скважины; установлении, поддержании и контроле за заданным режимом эксплуатации; обеспечении нормальной работы оборудования в осложненных условиях (гидратообразование, коррозия, обводнение, вынос на забой твердых частиц, растепление вечномерзлых пород), а также в поддержании в исправном состоянии контрольно-измерительных приборов и средств автоматики.

В природном газе могут присутствовать коррозионно-опасные вещества: углекислый газ и сероводород, содержание которых в процессе подготовки газа к транспорту доводится до значений, установленных ГОСТ 5542–2014. Газы горючие природные промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия.

Эксплуатационные скважины проектируются и бурятся при реализации пробной эксплуатации месторождения и промышленной разработке месторождения:

1. Эксплуатационные (добывающие) — для добычи газа и газового конденсата.
2. Нагнетательные — для закачки в продуктивные горизонты сухого воздуха, газа при добыче газового конденсата, увеличения дебита эксплуатационных скважин, снабженных воздушными подъемниками.
3. Опережающие добывающие — для добычи углеводородов с одновременным уточнением строения продуктивного пласта.
4. Специальные — опорные, параметрические, оценочные, контрольные и наблюдательные — для изучения геологического строения малоизвестного района, определения изменения коллекторских свойств продуктивных пластов, наблюдения за пластовым давлением и фронтом движения водосырьевого контакта, степени выработки отдельных участков пласта, термического воздействия на пласт, обеспечения внутрипластового горения, закачки сточных вод в глубокозалегающие поглощающие пласты и др.

Для эксплуатации добывающей скважины устанавливается технологический режим, обеспечивающий плановые отборы газа, конденсата и жидкости, предусмотренные техническим проектом при соблюдении условий надежности и безопасности эксплуатации скважин.

Технологический режим работы добывающих скважин характеризуется следующими основными параметрами:

- а) пластовым, забойным и устьевым давлением;
- б) дебитом жидкости (газа), обводненностью продукции, газовым фактором (выходом конденсата) и количеством механических примесей в продукции;
- в) типоразмерами установленного внутрискважинного оборудования, режимами и временем его работы.

Для эксплуатации нагнетательной скважины устанавливается технологический режим, который обеспечивает закачку требуемых объемов рабочего агента в планируемом периоде, соблюдение условий надежности и безопасности эксплуатации скважин, предусмотренных техническим проектом и нормами закачки.

Технологический режим работы нагнетательных скважин характеризуется следующими основными параметрами:

- а) пластовым, забойным и устьевым давлением;
- б) приемистостью скважины и количеством механических примесей и нефти в закачиваемом агенте;
- в) температурой закачиваемого агента (для паронагнетательных скважин);
- г) типоразмерами установленного внутрискважинного оборудования, режимами и временем его работы.

Газовые и газоконденсатные скважины, в зависимости от степени разобщения пород интервалов продуктивных объектов, условно делятся на две категории:

- а) категория А — скважины с нецементируемым забоем в интервалах продуктивных объектов;
- б) категория Б — скважины с цементируемым забоем в интервалах продуктивных объектов.

Скважины категории А проектируются и строятся на газовых объектах, включающих один пласт или несколько продуктивных пластов, между которыми отсутствуют водоносные пропластки, и оборудуются фильтрами. Выбор типа фильтра определяется условиями устойчивости пород к разрушению и пескопроявлению из пласта в ствол скважины.

В отдельных случаях, обоснованных проектом разработки месторождения, закачивание скважин в продуктивных объектах, представленных устойчивыми породами-коллекторами, производят открытым забоем без перекрытия фильтрами.

Скважины категории Б проектируются и строятся на газовых объектах, включающих водоносные пласты (пропластки).

Схема эксплуатации скважин на месторождении (пакерная, беспакерная) должна быть обоснована Проектом разработки месторождения. Эксплуатация скважин по беспакерной схеме на месторождении, находящемся в стадии падающего пластового давления, должна быть обоснована документом, согласованным с органами Росгортехнадзора. Пакерная схема эксплуатации предусматривается для газовых и газоконденсатных скважин:

- при дебите газа (или газоконденсатной смеси) 500 тыс. м³/сут и более, расположенных на расстоянии менее 500 м от населенного пункта;
- при коэффициенте аномальности пластового давления $K_a = 1,1$ и выше;
- при размещении в кустах на месторождениях с наличием в разрезе многолетне-мерзлых пород (ММП) с расстоянием между устьями менее 40 м.

Все скважины на горизонты с аномально высоким пластовым давлением (АВПД) сооружаются и эксплуатируются по пакерной схеме. В остальных случаях схема компоновок подземного оборудования определяется проектом разработки месторождения.

По пространственному расположению в земной коре буровые скважины подразделяются на вертикальные, горизонтальные, наклонные.

В процессе эксплуатации скважин необходимо обеспечить регулярный контроль технического состояния эксплуатационной колонны, работы оборудования, а также получение исходных данных, необходимых для оптимизации технологического режима.

Известны два способа эксплуатации газовых месторождений: фонтанный и компрессорный. Основным способом эксплуатации газовых скважин является фонтанная добыча, так как газ характеризуется малыми величинами плотности и вязкости даже в пластовых условиях. Подъем природного газа происходит за счет перепада давления у устья скважины и в пласте и за счет расширения самого газа. Компрессорный способ эксплуатации скважины используют в том случае, если на забое скважины накапливается газовый конденсат или вода. Удаление воды и газового конденсата осуществляют с помощью газлифтного способа эксплуатации скважин или использования насосного оборудования.

Промысловая подготовка газа. Целью промысловой подготовки газа является его очистка от механических примесей, тяжелых углеводородов, капельной влаги и паров воды, сероводорода и углекислого газа.

Очистка газа от механических примесей, капельной жидкости осуществляется в сепараторах на УКПГ, УППГ, в пылеуловителях на ДКС.

В случае применения метанола в системе сбора следует предусматривать мероприятия, позволяющие выделять из газа метанольную воду и направлять ее на утилизацию.

Установки, предназначенные для подготовки газа и извлечения конденсата на газоконденсатных месторождениях, должны быть спроектированы с учетом влияния снижения пластового давления на их работу. В первую очередь имеются в виду изменения состава и количества сырья, снижение в составе конденсата тяжелых фракций, когда конденсат используется для производства какого-либо продукта: абсорбента, моторных топлив и т. д.

Компримирование газа на промысле. Компрессорная станция (КС) — комплекс сооружений и оборудования для повышения давления сжатия газа при его добыче, транспортировке и хранении.

Технологическая схема КС состоит из установок очистки газа, компрессорных цехов, установок воздушного охлаждения газа. Работа оборудования КС обеспечивается технологическими трубопроводами с запорно-регулирующей арматурой, маслосистемой, установками подготовки пускового, топливного и импульсного газов, системой электроснабжения и пр.

По виду выполняемой работы выделяют КС дожимные (головные), линейные КС магистральных газопроводов, КС подземных хранилищ газа, нагнетательные КС обратной закачки газов в пласт.

Производство сжиженного природного газа. Производство сжиженного природного газа основано на значительном (примерно в 600 раз) уменьшении занимаемого этим газом объема. СПГ — криогенная жидкость, получаемая из природного газа охлаждением до температуры конденсации $-161,5^{\circ}\text{C}$. Температура кристаллизации — $-182,5^{\circ}\text{C}$, плотность — $0,42\text{ кг/л}$. За счет этого достигается существенное сокращение расходов на хранение и транспортировку, которая может осуществляться специальными судами, контейнерами, автомобильным и железнодорожным транспортом и т. д., что позволяет СПГ составить серьезную конкуренцию традиционному трубопроводному газу. Кроме того, хранение СПГ обходится недорого; при этом образуются огромные «буферы энергии», доступ к которым обеспечивается за считанные секунды.

Как правило, производство СПГ включает следующие установки:

- а) подготовка газа;
- б) сжижение газа;
- в) фракционирование;
- г) хранение сжиженного газа;
- д) системы отгрузки.

В последнее время получили распространение новые технологии, которые активно применяются на заводах СПГ со средней производительностью (около 1,5 млн т СПГ в год). На таких заводах, как правило, используется цикл смеси холодильных агентов MRC (mixed refrigerant cycle). Заводы данного типа потребляют больше электроэнергии, но это окупается меньшими капитальными затратами.

В 2009 г. на Сахалине начал работу завод по производству сжиженного природного газа, производительность завода — 9,6 млн т СПГ в год. Технология сжижения природного газа с использованием двойного смешанного хладагента — лицензионная технология производства СПГ компании «Шелл», специально разработанная для холодного климата.

Природный газ охлаждается в двух циклах со смешанным хладагентом: в цикле со смешанным хладагентом предварительного охлаждения и в основном цикле со смешанным хладагентом. Смешанный хладагент состоит из смеси легких углеводородов, в основном этана и пропана. Изменяя состав хладагента в зимний и летний периоды, можно увеличить производство СПГ.

Мини-завод СПГ — это завод по сжижению газа производительностью 200 т/день (0,07 млн т/год). Занимаемая им площадь составляет 10 тыс. м² (5 тыс. м² приходится на системы предварительной очистки и сжижения газа; 5 тыс. м² — на системы охлаждения воды, хранилище СПГ, площадку для автотрейлеров СПГ).

На мини-заводах СПГ возможно использование двух технологических решений: технология «открытого цикла» (использование давления подаваемого газа в качестве источника энергии для его охлаждения) и технология «цикла расширения азота» (на основе циркуляции азота в замкнутом контуре, содержащем компрессоры и турбины).

Регазификация СПГ производится на специальных регазификационных терминалах, куда СПГ доставляется морскими танкерами. Терминалы состоят из причала, сливной эстакады, резервуаров для хранения, испарительной системы, установок обработки газов испарения из резервуаров и узла учета. Превращение СПГ в газ происходит в системе испарения с помощью нагрева. Подогрев может осуществляться прямым и косвенным способом. В первом случае газ получает тепло непосредственно от горячего теплоносителя, во втором тепло поступает к газу через промежуточный теплоноситель, обогреваемый горячим теплоносителем. В качестве горячего теплоносителя используется морская вода, в качестве промежуточного теплоносителя — пропан.

Капитальный ремонт скважин (КРС). Комплекс работ, связанных с восстановлением работоспособности призабойной зоны, целостности обсадных колонн, цементного кольца, ликвидацией аварий, а также спуском и подъемом оборудования при раздельной эксплуатации и закачке, пакеров-отсекателей, клапанов-отсекателей, газлифтного оборудования.

КРС включает ремонтно-исправительные, ловильные и ремонтно-изоляционные работы, а также возврат и ликвидацию скважин. К ремонтно-исправительным работам относятся исправления смятий, сломов, трещин и замена поврежденной части эксплуатационной колонны, герметизация устья скважины, разбуривание цементных пробок.

Ловильные работы в скважине включают извлечение упавшей колонны насосно-компрессорных труб, насосных штанг, инструментов и др., а также чистку ствола скважины. Большинство ловильных инструментов можно разделить на 5 категорий:

- шламметаллоуловители для улавливания небольших объектов или обломков, вес которых слишком велик для подъема путем циркуляции раствора;
- инструменты для фрезерования головы аварийного инструмента;
- режущий инструмент для обрезки труб;
- внешние захваты для извлечения аварийного инструмента после соединения его с внешней поверхностью (при помощи ловильного метчика или овершота);
- внутренние захваты для извлечения аварийного инструмента после соединения с его внутренней поверхностью (ловильные метчики для внутреннего захвата).

Ремонтно-изоляционные работы проводят при прорыве в скважину пластовых вод (верхних или нижних по отношению к эксплуатируемому продуктивному горизонту, подошвенных, краевых и поступающих из соседних скважин). Приток верхних вод, поступающих через дефект в колонне, ликвидируют заливкой цементного раствора, а также других реагентов и материалов, спуском дополнительной колонны, пакеров. Приток вод, поступающих по заколонному пространству через отверстия фильтра, ликвидируют нагнетанием через эксплуатационный или специальный фильтр растворов под давлением. Нижние и подошвенные воды, проникающие через цементный стакан или дефект в зумпфе, изолируют созданием нового цементного стакана (предварительно разбурив старый). Воды, поступающие по заколонному пространству, ликвидируют нагнетанием растворов под давлением через отверстия фильтра. Нижние и верхние воды изолируют также созданием цементных поясов вокруг эксплуатационной колонны в интервале между источником обводнения и эксплуатационным объектом.

В случае невозможности восстановления технического состояния или прекращения эксплуатации скважину ликвидируют (отсекают продуктивные пласты, устраняют заколонные перетоки, устанавливают цементные мосты в стволе скважины).

Комплекс работ, осуществляемый при КРС, является источником негативного воздействия на окружающую среду за счет образования выбросов, сбросов загрязняющих веществ (ЗВ), отходов производства.

Особо следует отметить, что ремонт скважин с подводным закачиванием осуществляется со специализированных судов, и его технология отличается от технологии ремонта скважин с надводным устьем. Для подводных скважин разработан специальный комплекс технических средств.

При ремонте скважин для предотвращения выбросов применяют плащечный превентор или герметизирующее устройство устья скважин.

Системы поддержания пластового давления. Повышение газоотдачи газовых пластов достигается путем своевременной изоляции прорвавшихся вод по отдельным пропласткам. Также повышение газоотдачи достигается путем доведения пластового давления до минимально возможного — отбор газа из скважин под вакуумом.

Для поддержания пластового давления в пласт закачивают рабочий агент: углеводородные, неуглеводородные газы или их смеси.

В качестве углеводородных газов используют большей частью сухой газ, добываемый из газоконденсатной смеси, прошедшей промысловую обработку с целью удаления высококипящих углеводородов C_5 + высшие (сайклинг-процесс), а в качестве неуглеводородных газов — двуокись углерода, азот, дымовые газы.

Пластовое давление поддерживают на уровне (или выше) давления начала конденсации и ниже давления начала конденсации пластовой газоконденсатной смеси. В первом случае во всем пласте, за исключением призабойных зон, эксплуатационных скважин создаются условия, предотвращающие выделение конденсата. Во втором случае месторождение разрабатывают вначале в течение некоторого времени на режиме истощения и лишь затем начинают закачку в пласт газа. Для обоснования экономической целесообразности обратной закачки определяют содержание конденсата в газе, оценивают схему обработки добываемого газа и расходы на нагнетание рабочего агента. Количество закачиваемого газа может быть выше (используют газ с соседних месторождений), равным или меньшим количества отбираемого из пласта газа. В последнем случае часть отбираемого из пласта газа подается потребителю.

Вспомогательные процессы

Энергоснабжение. Потребление и генерация электро- и тепловой энергии являются одним из важнейших аспектов при добыче газа. Выработка энергии необходима для удовлетворения потребностей объектов основного и вспомогательного производства, обеспечивающих работоспособность этих объектов в целом на газовых месторождениях.

При эксплуатации месторождений природного газа часть добываемого сырья (извлекаемый из недр природный газ) полезно используется для проведения обязательных технологических операций. На собственные нужды добывающие организации используют природный газ как добытые газообразные углеводороды с примесями (H_2S , CO_2 , N_2 , RSH и др.), не прошедшие, так и прошедшие обработку на промысле.

Системы охлаждения. Охлаждение газа — понижение температуры перекачиваемого газа на газовых сборных пунктах и КС.

Охлаждение газа производят между ступенями сжатия компрессорных агрегатов и на выходе из компрессорной станции. Межступенчатые холодильники для охлаждения газа обеспечивают определенную температуру газа на входе в последующую ступень компримирования, массовая производительность которой будет тем выше, чем ниже температура всасываемого газа.

Водоснабжение. Предприятия нефтегазового комплекса являются водопользователями, осуществляющими самостоятельный забор воды из источников и отведение сточных вод с использованием соответствующих водозаборных и водоотводящих сооружений. Водозабор осуществляется как из поверхностных, так и из подземных источников.

Выделяют несколько типов воды по цели использования:

- хозяйственно-питьевая;
- противопожарная;
- оборотная;
- повторно используемые воды.

В качестве источника водоснабжения следует рассматривать водотоки (реки, каналы), водоемы (озера, водохранилища, пруды), моря, подземные воды (водоносные пласты, подрусловые, шахтные и другие воды).

Также в определенных целях в качестве источников водоснабжения могут использоваться — очищенные сточные воды и попутно добываемые с газом воды (после их подготовки).

Канализация и очистные сооружения. На газовых промыслах образуются, как правило, следующие виды сточных вод:

- производственные, загрязненные нефтепродуктами, метанолом, ДЭГом, сероводородом, минеральными солями, механическими примесями, ингибиторами коррозии и гидратообразования;
- производственные, имеющие повышенное солеотложение и незагрязненные технологическими продуктами, образующимися при продувке систем открытых циклов водоснабжения, котлов и ХВО котельных;
- дождевые, загрязненные преимущественно взвешенными веществами минерального происхождения и нефтепродуктами, с обвалованных и отбортованных технологических площадок;
- бытовые.

Состав очистных сооружений зависит от характеристики и количества сточных вод, поступающих на очистку, требуемой степени их очистки, метода обработки осадка в соответствии с нормами.

Установка по приему, травлению, крашению и перемешиванию метанола. Наиболее распространен на газовых промыслах способ подачи метанола в струю газа. При этом он образует с парообразной и жидкой влагой спиртоводные смеси, температура замерзания которых значительно ниже нуля. Пары воды поглощаются из газа, что значительно снижает точку росы, и, следовательно, создаются условия для разложения гидратов или для предупреждения их образования.

Для борьбы с гидратообразованием на групповом пункте предусматривается одна метанольная установка (иногда две).

Метанол вводится, как правило, после сепараторов первой ступени под избыточным давлением, равным разности между давлением высоконапорной скважины, с которой соединен метанольный бачок, и давлением скважин, в которые вводится метанол, что составляет около 30–50 кгс/см².

Расход метанола увеличивается с ростом давления и уменьшением температуры. Для характерных термобарических условий эксплуатации шлейфов на северных месторождениях теоретический расход метанола может изменяться в довольно широких пределах (от 0 до 300 г/1000 м³ газа). На практике же необходим дополнительный запас в 20–25% по расходу метанола при ингибировании шлейфов с целью устранения опасности появления гидратов в коллекторе.

Факельные установки. Факельные установки предназначены для сжигания некондиционных газовых и газоконденсатных смесей, образующихся при работе оборудования или аварийных сбросах.

На объектах добычи газа и конденсата используются горизонтальные и высотные факельные установки для сжигания углеводородных смесей и сбросных газов после продувки (при введении в эксплуатацию, после КРС) скважин на газовых промыслах, газопроводов после капитального ремонта, технологического оборудования на газовых промыслах и установках подготовки газа, пылеуловителей на компрессорных станциях.

Горизонтальные факельные установки располагаются в специальных земляных амбарах на расстоянии около 100 м от устья скважин. Фонтанная арматура скважины соединена с амбаром горизонтальной трубой, конец которой выведен над землей. Горение происходит в открытом факеле от поверхности земли, а рассеивание ЗВ в вертикальной части факела. Температура продуктов сгорания 900–2000° С, в зависимости от сжигаемой смеси, коэффициент избытка воздуха 1–1,5.

На высотных факельных установках (высокого и низкого давления) факельные горелки расположены в верхней части факельной трубы. По факельному стволу поднимаются только горючие компоненты, а горение происходит в атмосфере над оголовком факельного ствола.

При эксплуатации сероводородсодержащих месторождений предпочтительно использовать высотные факельные установки для повышения степени рассеивания ЗВ.

Конструкция факельных установок обеспечивает безсажевое горение газовых смесей при соблюдении определенных условий истечения газа. Поскольку режим сброса газа в факельные системы может варьироваться в широком диапазоне, состав выбросов (сажевое/бессажевое горение) должен определяться расчетом для каждого конкретного случая (вида регламентной операции). Эффективное смешение углеводородных смесей с воздухом обеспечивается использованием факельной горелки с разделением газового потока на отдельные струи с помощью большого числа горелок либо с большим числом выходных отверстий.

Утилизация отходов. При бурении будут образовываться следующие виды отходов:

- а) шлам, выбуренный при использовании растворов на водной основе (бентонит/полимерные растворы на основе пресной воды), при бурении верхних интервалов скважин;
- б) шлам, выбуренный при использовании растворов на нефтяной основе, который образуется при бурении нижних интервалов скважин;
- в) отработанные буровые растворы (ОБР) на водной и нефтяной основе и промывочные растворы;
- г) твердые отходы строительства скважин.

Выбуренный шлам и отработанный буровой раствор могут закачиваться в подземные пласты через нагнетательные скважины.

В качестве безреагентных методов обезвреживания твердых отходов заслуживает внимания термический метод. Цель любой технологии термодесорбции состоит в том, чтобы получить твердые частицы, свободные от углеводородов (или ультранизкое содержание

органического углерода), для утилизации путем отгонки углеводородов из бурового шлама и извлечения углеводородов для повторного использования в буровом растворе.

Одним из наиболее известных и распространенных методов является захоронение ОБР и бурового шлама (БШ) в земляном амбаре (при обезвоживании) до полного высыхания с последующим захоронением. Метод отличается наибольшей простотой, но и наименьшей экологичностью вследствие продолжительного контакта ОБР с компонентами окружающей природной среды. Содержащиеся в отходах загрязнители вследствие подвижности и высокой проникающей способности мигрируют в почвогрунты, вызывая в них отрицательные негативные процессы.

Надежный и экологически безопасный метод закачивания отходов бурения и газодобычи в подземные пласты позволяет изолировать жидкие буровые отходы глубоко под землей в природных резервуарах. По мере ужесточения требований в области охраны окружающей среды закачка бурового шлама и отработанного бурового раствора в скважины становится все более привлекательной с точки зрения утилизации отходов бурения. Данная технология является альтернативой наземному сбросу буровых отходов, зачастую невозможному (бурение в русловых частях рек, природоохранные зоны). Технологически данный процесс представляет собой закачку измельченного и смешанного с водой шлама в виде пульпы в подземный горизонт через скважину.

Существует несколько способов закачки буровых отходов под землю:

- 1) закачивание буровых отходов в затрубное пространство;
- 2) закачивание в специально пробуренную скважину;
- 3) закачивание в скважину после завершения буровых работ.

Резервуарный парк. Резервуары хранения СПГ делятся на 4 типа:

- цилиндрические одностенные;
- двустенные;
- с цельной защитной оболочкой;
- подземные.

Подземные резервуары могут быть двух видов: заглубленные и подземные. Все типы подземных резервуаров обладают высоким уровнем безопасности по сравнению с другими типами и являются более экологически эффективными.

На объектах малотоннажного производства СПГ, как правило, хранится в цилиндрических стальных резервуарах объемом порядка 10–500 м³.

СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ

Добыча нефти и газа

Как известно, в стволе скважины всегда присутствует жидкость. На этапе бурения скважины — это буровой раствор. По окончании бурения его, как правило, замещают технической водой. А в результате мероприятий по освоению скважины ствол заполняется пластовой жидкостью (нефтью или нефтью с водой). Таким образом, в стволе скважины всегда присутствует столб жидкости.

Столб жидкости создает гидростатическое давление (P) на забой скважины, которое описывается известным уравнением:

$$P = \rho gh,$$

- где ρ — плотность жидкости;
 g — ускорение свободного падения;
 h — высота столба жидкости.

Для того чтобы в скважину поступала жидкость из пласта (будь то нефть, газ или вода), должно соблюдаться простое условие: пластовое давление должно быть выше гидростатического давления столба жидкости в стволе скважины.

Теперь, если энергия пласта изначально высока и пластовое давление выше давления столба жидкости в стволе скважины, то получаем естественный приток нефти. Такой способ называется фонтанный способ эксплуатации скважины.

Если энергии пласта недостаточно, чтобы обеспечить приток нефти в скважину, то у нас есть два варианта. Согласно приведенной выше формуле, нам надо либо уменьшить плотность жидкости (ρ) в стволе скважины, либо уменьшить высоту столба жидкости (h). На величину g мы повлиять не можем, так как это величина постоянная.

На изменении плотности жидкости основан газлифтный способ эксплуатации скважины. При этом способе с помощью колонны насосно-компрессорных труб (НКТ) в скважину закачивают сжатый газ. Пузырьки газа, поднимаясь к устью скважины, снижают плотность столба жидкости, что обеспечивает снижение гидростатического давления и соответственно приток нефти из пласта.

Если же снижения плотности жидкости недостаточно для притока нефти, то остается только снижать высоту столба жидкости. Этого достигают насосными способами эксплуатации скважины. В скважину, попросту говоря, спускают насос и откачивают присутствующую в ней жидкость. Высота столба жидкости снижается до тех пор, пока из пласта не начнет поступать нефть. В результате при работающем насосе в скважине устанавливается какой-то равновесный уровень столба жидкости, который называется динамическим уровнем.

Таким образом, выделяют три основных способа эксплуатации скважин:

- фонтанный;
- газлифтный;
- насосный.

Методы, предполагающие использование внешнего источника мощности для поднятия жидкости на поверхность, носят общее название механизированная добыча.

Фонтанный способ эксплуатации скважины

При фонтанном способе жидкость и газ поднимаются по стволу скважины от забоя на поверхность только под действием пластовой энергии, которой обладает нефтяной пласт. Этот способ является наиболее экономичным, так как не требует дополнительных затрат энергии на подъем жидкости на поверхность. Кроме того, при этом способе не требуется закупка дорогостоящего оборудования, требующего к тому же регулярного обслуживания.

Оборудование фонтанных скважин состоит из колонной головки, фонтанной арматуры и выкидной линии. Это оборудование относится к наземному. Подземное оборудование состоит из колонны насосно-компрессорных труб (НКТ), которые, как правило, спускают до глубины верхних дыр перфорации.

Насосно-компрессорные трубы (НКТ) в фонтанных скважинах служат для подъема жидкости и газа на поверхность, регулирования режима работы скважины, проведения исследовательских работ, борьбы со смолопарафиновыми отложениями, осуществления различных геолого-технических мероприятий (ГТМ), предохранения эксплуатационной колонны от коррозии и эрозии, предупреждения и ликвидации песчаных пробок, глушения скважин перед подземным или капитальным ремонтами, предохранения эксплуатационной колонны скважины от высокого давления при различных геолого-технических мероприятиях.

Газлифтный способ эксплуатации скважины

Газлифтная эксплуатация является продолжением фонтанной эксплуатации, когда пластовая энергия уменьшается настолько, что подъем жидкости на поверхность ею не

обеспечивается и возникает необходимость в дополнительной энергии. В качестве дополнительной энергии используется газ высокого давления.

В результате смешивания дополнительно поступающего в скважину газа с пластовой жидкостью образуется газожидкостная смесь с пониженной плотностью, что снижает давление на забое скважины. Пониженное забойное давление обеспечивает приток продукции из пласта и подъем газожидкостной смеси на поверхность.

Различают компрессорный газлифт и бескомпрессорный газлифт. Если для сжатия газа до необходимого давления и закачки его в скважину применяются компрессоры, то соответственно такой способ эксплуатации называется компрессорным газлифтом. Если в качестве рабочего агента для газового подъемника применяется газ из газовых пластов высокого давления, то в этом случае эксплуатация скважин называется бескомпрессорным газлифтом.

Преимущества газлифтной эксплуатации:

- все оборудование располагается на поверхности, что упрощает его ремонт и обслуживание;
- простота конструкций оборудования;
- возможность отбора больших объемов жидкости (до 1800 т/сут) независимо от глубины скважины и диаметра эксплуатационной колонны;
- простое регулирование дебита нефти скважины (увеличивая или уменьшая подачу газа в скважину);
- возможность эксплуатации пескопроявляющих и обводненных скважин;
- простота исследования скважин.

Недостатки газлифтной эксплуатации:

- необходимость частой замены НКТ, особенно в обводненных скважинах и в пескопроявляющих скважинах;
- низкий КПД подъемника и всей системы компрессор-скважина (при низких динамических уровнях КПД подъемника часто не превышает 5%);
- большая стоимость затрат на строительство компрессорных станций, газораспределительных будок и сети газопроводов в начале обустройства месторождений;
- большой расход электроэнергии на добычу 1 т нефти при эксплуатации малодебитных скважин с низкими динамическими уровнями.

Насосные способы эксплуатации скважин

Существуют следующие виды насосной эксплуатации скважин:

- установкой штангового глубинного насоса (УШГН);
- установкой электроцентробежного насоса (УЭЦН);
- установкой штангового (либо электропогружного) винтового насоса (УШВН, УЭВН);
- установкой электродиафрагменного насоса (УЭДН) и др.

РОЛЬ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В ГЛОБАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКЕ

Нефтедобывающая промышленность

На протяжении многих лет нефть является важнейшим фактором развития мировой экономики. Обладание нефтяными ресурсами считается залогом успешного развития любой страны. Контроль над этими ресурсами является источником непрерывного политического, экономического и даже вооруженного противостояния между отдельными участниками мирового рынка. За последние 30 лет мировое потребление нефти увеличилось с 2,2 до 3,9 млрд т/год. Мировые запасы нефти распределены крайне неравномерно, больше всего повезло ближневосточным странам.

Было отмечено, что с 1920 по 1970 г. мировая нефтедобыча увеличивалась не только почти в каждом новом году, но и по десятилетиям добыча росла практически в геометрической прогрессии (увеличивалась почти вдвое за каждые 10 лет). С 1979 г. происходит замедление темпов роста мировой нефтедобычи. В начале 80-х гг. даже происходит кратковременное снижение добычи нефти. В дальнейшем рост объемов добычи нефти возобновляется, но уже не такими стремительными темпами как на первом этапе. Несмотря на падение объемов добычи нефти в начале 80-х и периодически случающиеся кризисы, в целом мировая добыча нефти неуклонно растет. Среднегодовые темпы роста за период с 1970 по 2017 г. составили порядка 1,7%, причем этот показатель существенно меньше среднегодовых темпов роста мирового ВВП.

До 1948 г. основным поставщиком нефти на мировой рынок были США, однако с началом разработки ближневосточных месторождений США превращается из экспортера в импортера нефти. Крупнейшим потребителем нефти в мире является США — около 24% мирового потребления, из них около 40% составляет собственная добыча, остальной объем приходится на импортные поставки. За США по объемам потребления в порядке нарастания следуют Китай, Индия и Япония. Япония почти полностью обеспечивает свою потребность за счет импорта. Россия по объему потребления нефти занимает пятое место в мире, однако по объему потребления нефти на душу населения Россия занимает 17-е место.

Россия является одной из немногих стран, которая не только полностью обеспечена нефтью, но и в значительной мере экспортирует топливо. Велика ее доля в мировом балансе топливно-энергетических ресурсов, например по разведанным запасам нефти — около 10%.

В течение 2000–2017 гг. доля России в мировой добыче нефти возросла с 8,9% до 12,5%. На сегодняшний день она является одной из трех стран, определяющих динамику цен на нефтяном рынке (наряду с Саудовской Аравией и США).

По запасам нефти Россия занимает седьмое место в мире, уступая Саудовской Аравии, Кувейту, Ирану, Ираку, ОАЭ и Венесуэле. Динамика мировой добычи представлена на рис. 2.4.

Россия по итогам 2017 г. сохранила первое место в мире по нефтедобыче с долей 12,4% и является одним из мировых лидеров по экспорту нефти. В 2017 г. в России добыто нефти, включая газовый конденсат, — 546,8 млн т и экспортировано 257,0 млн т (+1,1% к 2016 г.).

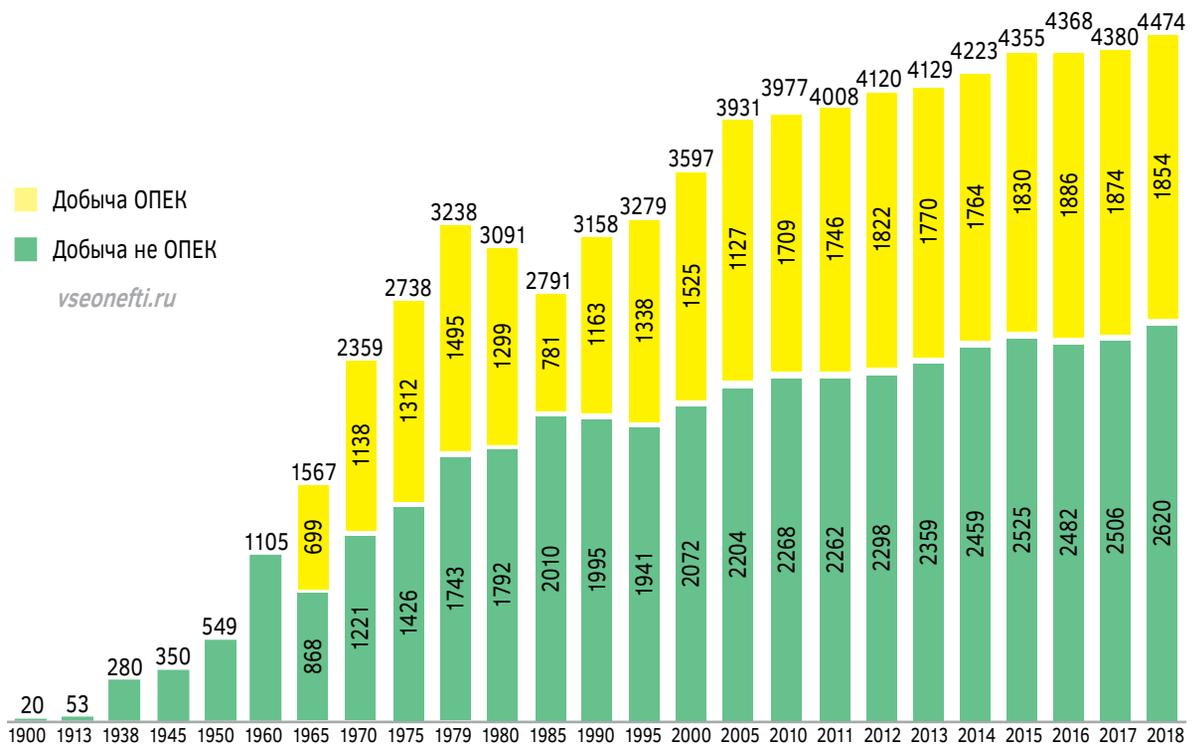


Рис. 2.4. Динамика мировой добычи нефти

В последние годы Россия занимает лидирующие позиции по объему добычи сырой нефти и обеспечивает 10–12% ее мировой торговли. Свыше четырех пятых объема российской нефти экспортируется в другие страны.

Основной объем нефти Россия экспортирует в страны дальнего зарубежья (около 90% всех экспортных поставок сырой нефти). На страны ближнего зарубежья (с учетом экспорта в государства — члены Таможенного союза) приходится порядка 8,3%. Доля российской нефти на рынках Европы составляет около 30%.

Экспортные поставки нефти в основном осуществляются по магистральным нефтепроводам, при этом через систему «Транснефть» экспортируется около 81% всей экспортируемой сырой нефти. В Европу нефть поставляется по нефтепроводу «Дружба», а в восточном направлении — по системе ВСТО с выходом на Китай («Сковородино–Мохэ») и к морскому экспортному терминалу Козьмино на Дальнем Востоке.

В последние годы доля поставок нефти по системе «Транснефть» существенно возросла, что связано с наращиванием соответствующих мощностей. Российская нефть поставляется по нефтепроводу «Дружба» в Белоруссию, Польшу, Венгрию, Словакию, Чехию, Германию и страны Прибалтики. Основными же рынками сбыта являются Великобритания и Ирландия (1/4 экспорта), Восточная Европа (1/4), страны Средиземноморья (Италия, Греция, Кипр, Турция, Болгария — около 20%), другие страны Западной Европы (Австрия, Швейцария, Нидерланды, Швеция, Дания, Финляндия, Бельгия, Лихтенштейн).

За последние 15 лет одной из основных особенностей экспортной политики России в области поставок нефти и нефтепродуктов стало практически полное прекращение транзита через сопредельные государства. Значительно снизились поставки по трубопроводу «Дружба». Это связано с наращиванием экспортных мощностей на западном (Балтийская трубопроводная система) и восточном направлениях (ВСТО, поставки нефти через Казахстан).

Экспортные поставки российской нефти по морю идут через морские порты: на Черном море — Новороссийск, на Балтийском — Приморск и Усть-Луга, на Тихоокеанском побережье — Козьмино.

Газодобывающая промышленность

В современной экономике ведущую роль играют энергетические ресурсы. Показателем развития экономики каждого государства является уровень потребления им энергоресурсов. Одним из важнейших видов энергоресурсов является природный газ. В настоящее время в мировом энергетическом балансе на долю природного газа приходится 17%. Согласно оценкам ряда международных организаций, в XXI в. ключевая роль в мировом энергоснабжении постепенно перейдет к природному газу. В пользу этого говорят его значительные запасы во многих регионах мира, возможность его транспортировки на любые расстояния, а также экономичность и экологические преимущества его использования.

Доля России в мировой добыче природного газа составляет 19,2%. Согласно оценкам Rystad Energy, 2018 г. оказался историческим для мировой газовой промышленности. В 2018 г. в мире было добыто 3,86 трлн м³ природного газа. Прирост добычи за год составил 164 млрд м³, что является крупнейшим увеличением производства газа с 2010 г. Больше всего в 2018 г. нарастила газодобычу Северная Америка (+71 млрд м³), далее следует Россия (+43 млрд м³), Ближний Восток (+39 млрд м³). Тогда как Европа показала снижение добычи природного газа, оказавшись единственным регионом с падающими производственными показателями.

Россия продолжает уверенно удерживать лидерство в мировом экспорте природного газа — около 40% международных поставок газа осуществляется с территории России. По итогам 2018 г. было экспортировано около 244,0 млрд м³ (+10% к 2017 г.).

Россия экспортирует природный газ в страны Европы, бывшего СССР и Азиатско-Тихоокеанский регион (АТР). Основная часть экспорта газа из России приходится на Европу, в которую газ поставляется по трубопроводам, в том числе морским — «Турецкий поток»

и «Северный поток». В страны АТР экспортируется СПГ с завода «Сахалин-2». В 2018 г. «Газпром экспорт» поставил в европейские страны 200,8 млрд м³ газа. Примерно 81% поставок из России приходится на страны Западной Европы (включая Турцию), 19% — на центрально-европейские государства. Крупнейшими импортерами являются Германия, Турция, Италия, Великобритания и Франция, на которые приходится около половины российского экспорта газа. Россия осуществляет экспорт и сжиженного природного газа. Часть продукции запущенного СПГ-завода на Ямале направляется в европейские страны — новый рынок сбыта российского СПГ. Продукция с «Сахалин-2» поставляется в страны АТР — Японию, Республику Корея и Китай.

РОЛЬ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В ЭКОНОМИКЕ РФ

Нефтедобывающая промышленность

Нефтяная промышленность России является основным сектором топливно-энергетического комплекса страны. В настоящее время Россия является одним из крупнейших в мире производителей, потребителей и экспортеров нефти.

От успешного функционирования этой отрасли зависит эффективное удовлетворение внутреннего и внешнего спроса на нефть и продукты ее переработки. Не менее важную роль эта отрасль играет в обеспечении энергетической безопасности и политических интересов России. Нефть по-прежнему остается важнейшим источником валютных и налоговых поступлений в бюджет страны. Удельный вес экспорта нефти и нефтепродуктов в общей валютной выручке страны составляет около 27%. Роль нефтяного комплекса России как источника бюджетных поступлений постоянно растет.

Значение нефти в народном хозяйстве России очень велико: это сырье для нефтехимии в производстве синтетического каучука, спиртов, полиэтилена, широкой гаммы различных пластмасс и готовых изделий из них, искусственных тканей; источник для выработки моторных топлив (бензина, керосина, дизельного и реактивных топлив), масел и смазок, а также котельного печного топлива (мазут), строительных материалов (битумы, гудрон, асфальт); сырье для получения ряда белковых препаратов, используемых в качестве добавок в корм скоту для стимуляции его роста.

На рис. 2.5 представлена диаграмма добычи нефти в России, начиная от зарождения нефтяной промышленности, по настоящее время. Видно, что добыча нефти в России с начала 2000-х гг. стабильно растет, хотя в последнее время темпы роста замедлились.

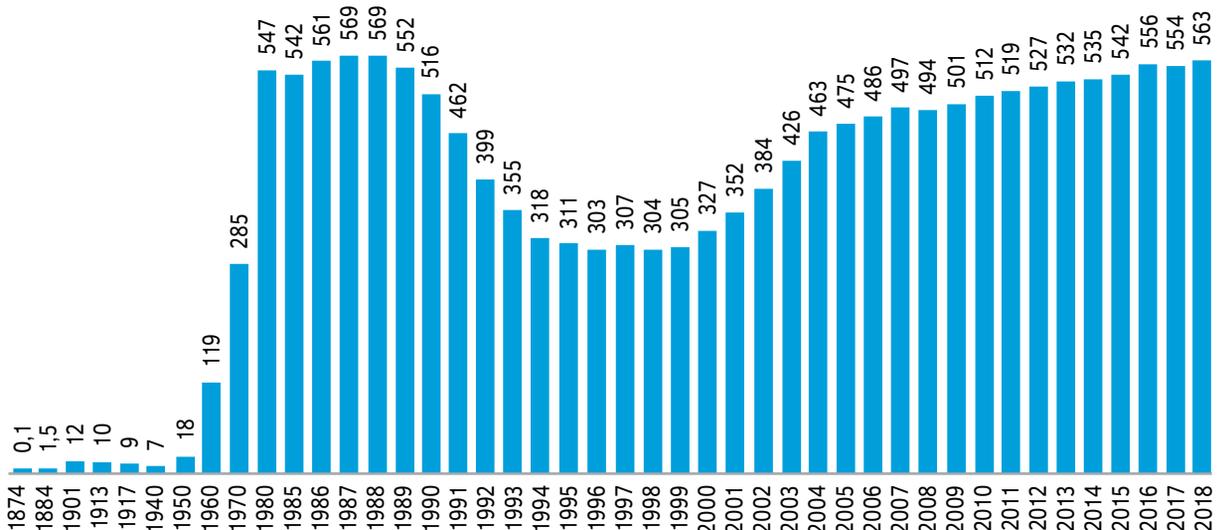


Рис. 2.5. Распределение объемов добычи нефти в России

В 90-е гг. добыча нефти резко снизилась, что связано с происходившими в тот период негативными процессами в экономике страны и выходом некоторых нефтедобывающих республик из состава СССР. По мере роста экономики страны и увеличения экспортных поставок нефти, начиная с 2000 г., добыча нефти стала наращиваться.

Внутренний рынок нефти России ограничен небольшим ростом потребления нефтепродуктов (0,5–1% в год). Свободная торговля нефтью составляет около 3 млн т/мес. Основные поставки осуществляются внутри корпоративной структуры российских вертикально-интегрированных компаний.

Таким образом, для экономики России нефтяная промышленность остается одной из главных отраслей промышленности, главным образом за счет увеличения добычи и переработки нефти. Большое количество бюджетных поступлений идет от экспорта нефти в страны СНГ и другие зарубежные страны.

Газодобывающая промышленность

Газовая промышленность — важнейший сегмент топливно-энергетического комплекса как России, так и мировой системы энергообеспечения в целом. Газовая промышленность России является одним из крупнейших источников валютных и налоговых поступлений в бюджет страны. Доля нефтегазовых доходов в общих доходах федерального бюджета в 2017 г. составила более 45,0%.

В России ежегодно потребляется (с учетом расхода газа на технологические нужды системы газоснабжения) около 450–460 млрд м³ газа, или более 60% от всего объема газа, добываемого в стране. Доля природного газа в первичном топливно-энергетическом балансе страны составляет 54% и продолжает расти.

Основным потребителем газа в России является электроэнергетика и теплоэнергетика, которые ежегодно используют около 180 млрд м³ газа. При этом спрос на газ со стороны электро- и теплоэнергетических компаний постоянно растет. Тенденция к повышению удельного веса газа в энергетическом балансе страны не может рассматриваться как благоприятный фактор улучшения структуры потребления топлива. Дело в том, что дешевизна газа является одной из причин его неэффективного использования. Она провоцирует рост спроса даже в тех районах страны, где традиционно доминировали другие энергоносители, например уголь. Использование газа по заниженным ценам является серьезной проблемой для всей национальной экономики, поскольку сдерживает развитие технического прогресса, одним из приоритетных направлений которого в современном мире является энергосбережение.

В последние годы также наметилась тенденция к увеличению потребления компримированного природного газа на автотранспорте. В 2017 г. объем его потребления в России составил около 600 млн м³, что на 11% выше уровня 2016 г. В 2017 г. в России было введено в строй 34 объекта газозаправочной инфраструктуры, и к концу года их количество превысило 350 единиц.

На российский рынок поставляется также газ, импортируемый из центральноазиатских государств — производителей газа (Туркменистана, Казахстана, Узбекистана). Закупки импортного газа и его перепродажа на российском рынке осуществляются в основном структурами ОАО «Газпром». Потенциал импорта газа в Российскую Федерацию в 5–7-летней перспективе составляет порядка 30–35 млрд м³ газа в год. Преимущество газа перед другими энергоносителями состоит в том, что он экологически значительно безвреден или в отличие от угля и мазута. Кроме того, газ — практически незаменимый вид широко распространенного сырья для химической промышленности, из которого изготавливаются самые разные виды удобрений и полимеров. Применение газа в качестве удобного, недорогого топлива в коммунальном хозяйстве и в быту создает неопределимые удобства для населения и особенно сельского.

Уровень газификации природным газом в России по состоянию на начало 2018 г. составляет 68,1%. Однако уровень газификации, особенно в сельской местности, остается недостаточным и составляет в настоящее время около 30% против 60% в городах.

Существовало два основных, существенно различных сценария динамики спроса на газ на внутреннем рынке.

Первый сценарий основан на предположении об инерционном изменении действующих цен на газ. Он не стимулирует экономию газа потребителями и межтопливную конкуренцию.

Второй предполагает включение ценовых механизмов давления на спрос газа, под действием которых произойдет некоторое сжатие спроса под воздействием роста цен на него. Это возможно посредством либерализации цен на энергоносители и приближения их к уровню, в большей степени соответствующему реальному соотношению спроса и предложения.

В настоящее время реализуется второй сценарий развития спроса на газ, согласно которому возрастание спроса на газ будет происходить в пределах 1–1,5% в год. При этом наиболее крупные потребители газа будут вынуждены инвестировать средства в снижение газоемкости производства. Объем потребления газа на внутреннем рынке в этом случае не превысит 430 млрд м³ в год, что с учетом ожидаемого увеличения роста добычи газа (в первую очередь независимыми производителями) позволяет говорить об отсутствии перспективы ресурсных ограничений на внутреннем рынке газа.

В случае же реализации первого сценария рост спроса на газ может составлять 3–4% в год. При сохранении существующих темпов роста добычи газа такой рост спроса на него привел бы к превышению ресурсных возможностей газового рынка. При этом газоемкость экономики не снизилась бы, поскольку при таком сценарии отсутствуют стимулы для технического перевооружения производств (электростанции, котельные, химические, нефте- и газохимические и металлургические производства).

ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ

Нефтедобывающая промышленность

В последнее десятилетие изменилась структура сырьевой базы нефтяной промышленности. Негативные изменения структуры сырьевой базы, связанные прежде всего с увеличением доли трудноизвлекаемых запасов, могут резко снизить добычу нефти в ближайшей перспективе. Прежде всего, это месторождения с тяжелой высоковязкой нефтью и обводненные месторождения. Коэффициент нефтеотдачи пластов в среднем по миру находится в пределах 25–60%. При этом остаточные запасы нефти после разработки месторождений с использованием традиционных технологий составляют от 55 до 75% от первоначальных. В этой связи одной из основных проблем на ближайшие десятилетия будет поиск инновационных средств и технологий повышения нефтеотдачи пластов.

В качестве перспективных для действующих месторождений традиционной нефти следует отметить следующие технологии, основанные на:

- технологии многостадийного гидравлического разрыва пласта (МГРП);
- механическом вытеснении нефти со смешением (закачка воды, углекислого газа, углеводородных газов и др.);
- тепловом воздействии на свойства нефти (закачка горячей воды, горячих дымовых газов, организация внутрислового окисления и др.);
- физико-химическом воздействии на свойства нефти (закачка водных растворов с поверхностно-активными веществами и полимерами).

Наряду с технологией МГРП в ближайшем будущем будет перспективным направление, основанное на «умных» полимерах в нефтедобыче. На них будет возложена задача поиска

системы, которая находит приток воды и блокирует его, но не препятствует течению нефти. В активной разработке находится так называемый «умный» проппант, который при взаимодействии с водой уменьшается в объеме, а при взаимодействии с нефтью увеличивается. Использование проппанта при МГРП позволяет увеличить приток нефти и уменьшить обводненность скважинной продукции.

С учетом меняющейся структуры запасов наиболее важными технологическими компетенциями для России становятся те, которые связаны с разработкой трудноизвлекаемых ресурсов (Баженовская свита, доманиковые и ачимовские отложения, природные битумы). При этом базовым направлением является развитие технологии типа SAGD. Для российских нефтяных месторождений необходимо адаптировать освоение такой технологии применительно к различным условиям залегания пластов, типам имеющихся резервуаров и свойствам нефти. В частности, это касается природных битумов Волго-Уральской битумо-нефтегазоносной провинции, сконцентрированных в пермских отложениях и залегающих на глубине от 50 до 400 м. Эти отложения имеют сложнопостроенную структуру карбонатных и терригенных коллекторов.

Основными путями совершенствования данной технологии являются:

- снижение энергоемкости (применение вакуумной тепловой изоляции паропроводов, производство пара в режиме когенерации и др., что особенно актуально в северных условиях при наличии вечной мерзлоты, которая вызывает большие потери тепла);
- повышение эффективности разделения нефти и воды с повторным производством пара для нагнетания в скважину (высокое потребление воды).

Перспективным методом для разработки месторождений является внутрислоевого горение. Технология основана на инициации и поддержании процессов горения углеводородов внутри пласта при помощи закачки окислителя (воздух, кислород). Процессы горения обеспечивают разогрев пласта, крекинг тяжелых фракций, повышение внутрислоевого давления и подвижности нефти.

Для правильного и точного представления крекинга и окисления углеводородов требуется учет огромного количества реакций, так как типичный образец тяжелой нефти состоит из сотен различных углеводородных и неуглеводородных соединений разнообразного молекулярного строения. С другой стороны, контроль процесса горения достаточно сложен в части предсказания необходимого количества нагнетаемого в пласт воздуха, температуры инициации и т. д. Поэтому для достижения максимальной эффективности разработки месторождений с закачкой воздуха невозможно без создания модели горения нефти и ее компонентов. Наиболее распространенная модель (Belgrave) учитывает реакции низкотемпературного окисления (LTO), термолитиза (thermal cracking) и высокотемпературного окисления (HTO).

Данный метод добычи трудноизвлекаемых запасов нефти, по мнению инженеров-исследователей, должен обеспечить коэффициент извлечения нефти до 50%, однако опыт его практического применения в промышленных масштабах на текущий момент отсутствует и технология находится в ранней стадии развития.

Для разработки обводненных месторождений нефти учеными Института проблем нефти и газа РАН разработана полимерно-гелевая система «Темпоскрин», которая опробована на 32 нефтяных месторождениях России, Казахстана и Азербайджана. Технология предназначена для изоляции высокопроницаемых обводненных пластов, изменения направлений фильтрации, увеличения охвата продуктивных пластов воздействием и повышения конечного нефтеизвлечения.

Реагент «Темпоскрин» представляет собой порошок светло-желтого цвета, легко растворяется в воде, малочувствителен к воздействию солей и стоек к деградации в пластовых условиях. Применение «Темпоскрин» не связано с внесением сшивающих добавок, что упрощает технологию его применения.

Повышение нефтеотдачи пластов при применении «Темпоскрин» достигается за счет особых свойств приготавливаемой на его основе полимерно-гелевой системы. Водные растворы «Темпоскрин» обладают сильно выраженными аномальными реологическими свойствами: со снижением давления в движущемся потоке вязкость водного раствора возрастает. Поэтому при закачке в пласт частицы «Темпоскрин» устремляются в зоны минимального гидродинамического сопротивления, заполняя наиболее крупные обводненные поры, каверны и трещины. Это позволяет выравнивать профиль приемистости в нагнетательных скважинах и изолировать обводненные пропластки.

Технология воздействия на пласт заключается в последовательной закачке в нагнетательные скважины заданных объемов водного раствора реагента «Темпоскрин», определенной концентрации и продавке его оторочками воды.

В целом технология «Темпоскрин» позволяет:

- подключить в разработку ранее не работавшие пласты и пропластки;
- увеличить коэффициент охвата пластов заводнением;
- изменить фильтрационные потоки жидкости;
- выровнять профиль приемистости нагнетательной скважины и пласта;
- повысить вытесняющую способность закачиваемой системы;
- за счет флокулирующих свойств создать условия для возникновения дополнительного остаточного сопротивления воде;
- уменьшить обводненность добываемой продукции;
- повысить нефтеотдачу высокообводненных пластов на поздней стадии разработки.

В нынешнем столетии особо перспективным будет развитие технологий добычи нефти и газа на шельфе арктических морей.

В долгосрочной перспективе применительно к добыче углеводородов на арктическом шельфе следует выделить два основных направления:

- развитие технологий глубоководного бурения и добычи углеводородов на основе ледостойких и сейсмически устойчивых платформ;
- создание подводных роботизированных добычных комплексов с длительным ресурсом работы в автоматическом режиме и дистанционным управлением.

Существенное развитие получают технологии добычи, основанные на бурении горизонтальных и разветвленно-горизонтальных скважин. Приоритетные направления научно-исследовательских работ в данной области:

- резкое повышение нефтеотдачи продуктивных пластов углеводородных месторождений;
- бурение наклонных или горизонтальных стволов из законсервированных скважин с целью ввода их в эксплуатацию с новым, повышенным дебитом;
- извлечение остаточных запасов нефти с целью восстановления месторождений, находящихся в поздней стадии добычи углеводородов при высокой обводненности добываемого углеводородного сырья;
- разобщение пластов с целью улучшения их нефтеотдачи.

Одной из перспективных технологий будущего является бурение посредством плавления горных пород. При этом ученые рекомендуют использовать термическое, плазменное и лазерное плавление в процессе бурения.

Следующее направление развития нефтегазовой отрасли будет связано с использованием информационных (цифровых) технологий в разведке и разработке месторождений. Особенно это актуально в условиях падения цен на нефть, истощения легко извлекаемых запасов нефти и усложнения условий ее добычи. Развитие цифровых технологий в добыче нефти и газа будет идти по пути использования роботов, искусственных нейронных сетей, роевого интеллекта, моделей резервуаров на основе искусственного интеллекта, экспертных систем, а также технологий моделирования, вычисления и визуализации для

создания частичных или полных виртуальных обстановок реальных нефтегазовых объектов (месторождений, скважин, систем) для анализа производственных задач и визуализации.

Весьма перспективной является технология безлюдной добычи углеводородов «Robotic Process Automation» (RPA). Она позволяет осуществить замену части человеческого труда роботами. Практически любая задача, которая решается оператором с помощью мышки и клавиатуры на экране компьютера, может быть потенциальной областью применения RPA. Любые повторяемые рутинные действия могут быть автоматизированы с помощью программного обеспечения, которое называется «программный бот». Боты выполняют задания по аналогии с человеком, используя те же интерфейсы, что и операторы.

Технология RPA предполагает создание цифрового двойника месторождения и управления им в дистанционном режиме. «Безлюдные» технологии уже начали внедряться в отечественную практику добычи. Так, например, в ООО «Газпромнефть-Хантос» (дочернее предприятие ПАО «Газпромнефть») управление производственными процессами на Южно-Приобском месторождении происходит из офиса компании благодаря созданному цифровому двойнику месторождения. По предварительным оценкам, благодаря запуску системы цифрового двойника операционные затраты на освоение месторождения могут снизиться на 15%.

Газодобывающая промышленность

За последние несколько десятилетий мировая газовая промышленность в развитых странах превратилась в одну из самых технологически продвинутых отраслей промышленности. В настоящее время роль технологического фактора в развитии нефтегазового сектора в России и мире еще больше повышается. Связано это с рядом процессов, происходящих в мировом энергетическом секторе: происходит сокращение доли новых легкодоступных нефтегазовых месторождений; снизились мировые цены на нефть; ценообразование продуктов переработки в числе прочих факторов зависит от стоимости процесса извлечения газа и др. Стоимость продуктов переработки газа определяет не только экономическую, но и политическую картину всех стран мира, поэтому к данному фактору постоянно приковано внимание общественности.

Все эти взаимосвязанные тренды последних лет оказывают существенное влияние на технологическое развитие мирового нефтегазового сектора. Во всех странах ведутся активные поиски новых технологий в добыче газа. Страна, в которой процессы добычи и переработки газа будут упрощены и удешевлены благодаря новым разработкам, сможет получить более высокие прибыли после реализации сырья.

Значительный потенциал для дальнейшего развития газовой отрасли несет в себе развитие добычи нетрадиционных источников природного газа. Так, в последние несколько лет быстрыми темпами развивается разработка сланцевого газа в США. В свою очередь, для России актуальным являются технологии по извлечению метана из угольных пластов. В частности, в ПАО «Газпром» данное направление называют одним из основных направлений стратегии расширения ресурсной базы. Особое место для расширения ресурсной базы для отечественных и зарубежных нефтегазовых компаний занимает реализация проектов по добыче природного газа на морском шельфе, в том числе в Арктике. В области новых методов увеличения нефтеотдачи и интенсификации добычи российские нефтегазовые компании адекватно отреагировали на введенную правительством РФ политику импортозамещения. Сегодня в практической деятельности нефтегазовых компаний прослеживается тенденция по разработке собственных технологий, направленных на повышение газоотдачи пластов и интенсификации добычи — тепловых, газовых, химических, гидродинамических и др.

В настоящее время развитие новых технологий добычи газа идет по следующим трем основным направлениям (табл. 2.5).

Таблица 2.5. Основные направления развития технологий добычи газа

Направление	Технологии
Геология, поиск и разведка месторождений	Создание методов, технических средств и технологий, обеспечивающих качественный рост результативности геологоразведочных работ и эффективное строительство поисково-разведочных скважин
	Разработка новых и совершенствование существующих методов оценки ресурсов и запасов углеводородного сырья
Разработка месторождений	Создание технологий и технических средств для эффективной добычи природного газа
	Создание новых схем и методов разработки месторождений с помощью наклонно-направленных, горизонтальных и многозабойных «интеллектуальных» скважин с большими отклонениями от вертикали
	Разработка методов, технических средств и технологий освоения трудноизвлекаемых и нетрадиционных ресурсов газа в низконапорных коллекторах, газогидратных залежах и метана угольных пластов
	Создание новых экономически эффективных технологий добычи и использования «низконапорного» газа
Экология	Разработка и внедрение методов и технологий сооружения промышленных объектов, обеспечивающих сохранение природных ландшафтов
	Разработка методов снижения техногенного воздействия предприятий отрасли
	Создание системы геодинамического мониторинга за разработкой месторождений
	Разработка и внедрение технологий и оборудования, обеспечивающих снижение выбросов парниковых газов

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Дмитриевский, А. Н. Фундаментальный базис инновационного развития нефтяной и газовой промышленности в России / А. Н. Дмитриевский [электронный ресурс]. — 19 с. — URL: <http://oilgasjournal.ru/2009-1/4-rubric/dmitrievsky-f-b.pdf> (дата обращения: 28.10.2019). — Загл. с экрана.
2. Добыча нефтяного сырья // Минэнерго России [официальный сайт]. — 2019. — URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1209> (дата обращения: 25.10.2019). — Загл. с экрана.
3. Еремин, А. Н. Новая классификация цифровых и интеллектуальных скважин / А. Н. Еремин // Автоматизация и ИТ в нефтегазовой области. — 2016. — № 2 (24). — С. 2–4.
4. История технологии добычи нефти с античности до середины 20-го века [электронный ресурс]. — URL: <https://znaytovar.ru/s/Istoriya-tekhnologii-dobychi-neft.html> (дата обращения: 25.10.2019). — Загл. с экрана.
5. Кадырли, А. М. Из истории развития дореволюционной бакинской нефтеперерабатывающей промышленности / А. М. Кадырли. — Баку : Элм, 1976. — 86 с.
6. Кострин, К. В. Федор Прядунов и его нефтяной завод / К. В. Кострин. — Сыктывкар, 1959. — 40 с.
7. Метод парогравитационного дренажа (SAGD) // Все о нефти [сайт]. — URL: <https://vseonefti.ru/upstream/sagd.html> (дата обращения: 28.10.2019). — Загл. с экрана.
8. Миронов, Д. А. Перспективные технологии добычи нефти и газа / Д. А. Миронов [электронный ресурс]. — 20 с. — URL: <http://www.tatnipi.ru/upload/sms/2018/geol/013.pdf> (дата обращения: 28.10.2019). — Загл. с экрана.
9. Нетрадиционная нефть: технологии, экономика, перспективы : монография / под ред. Д. А. Грушевенко, В. А. Кулагина. — М. : ИНЭИ РАН, 2019. — 62 с.
10. Нефтегаз : ежемесячное информационно-аналитическое издание. Дайджест-2 : Цифровая трансформация нефтегазовой отрасли: популярный миф или объективная реальность [электронный ресурс]. — URL: http://oilandgasforum.ru/data/files/Digest%20site/DAIDJEST%20WEB2_2.pdf (дата обращения: 28.10.2019).
11. Нефтегазовый комплекс: производство, экономика, управление: учеб. для вузов / [Ю. Н. Линник, В. Ю. Линник, В. Я. Афанасьев, О. В. Байкова и др.]; под ред. Ю. Н. Линника, В. Я. Афанасьева — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Экономика, 2017. — 780 с. — (Высшее образование).

12. Нефть и газ. Мировая история / гл. ред. и сост. И. Мазур, А. Лобов. — М. : Изд. дом «Земля и человек XXI век» ; ИЦ «Елима», 2004. — 896 с.
13. *О'Коннер, Х.* Империя нефти / Х. О'Коннер ; пер. с англ. К. Н. Козарез и Н. И. Кузьминского ; вступ. статья А. А. Манукяна и К. Н. Козарез ; ред. А. Л. Злотников. — М. : Изд-во иностр. лит., 1958. — 490 с.
14. Основы нефтегазового дела: учеб. пособие / В. Г. Крец, А. В. Шадрина. — Томск : Изд-во Томского политехнического ун-та, 2010. — 182 с.
15. *Рогозин, В. И.* Нефть и нефтяная промышленность (с прил. «Исследования кавказской нефти гг. Морковникова и Оглоблина»). С 7-ю литографическими картами / В. И. Рогозин. — СПб. : Тип. Товарищества «Общественная польза», 1884. — 561 с.
16. Способы воздействия на призабойную зону скважин [электронный ресурс]. — URL: https://studbooks.net/1787953/geografiya/sposoby_vozdeystviya_prizaboynuyu_zonu_skvazhin (дата обращения: 25.10.2019). — Загл. с экрана.
17. Увеличение нефтеотдачи на основе АСП // Салым Петролеум [официальный сайт]. — URL: <https://salympetroleum.ru/technologies/newoil/asp/> (дата обращения: 28.20.2019). — Загл. с экрана.
18. Умные месторождения Салыма // ROGTEC. Российские нефтегазовые технологии. — 2010. — 31 авг. — P. 62–65. — URL: https://rogtecmagazine.com/wp-content/uploads/2014/09/06_SPD_Smartfields.pdf (дата обращения: 26.12.2018). — Загл. с экрана.
19. Управление инновационным развитием компаний нефтегазового комплекса: монография / Ю. Н. Линник, В. Ю. Линник, А. А. Каверин ; Государственный университет управления. — М. : Изд. дом ГУУ, 2018. — 216 с.
20. *Фукс, И. Г.* Похвальное слово керосиновой лампе / И. Г. Фукс, А. Лукса, В. А. Матищев // Нефть России. — 1999. — № 1. — С. 82–84.
21. *Щелкачев, В. Н.* Отечественная и мировая история нефтедобычи. История развития, современное состояние и прогнозы / В. Н. Щелкачев. — М., 2002. — 132 с.
22. *Эдер, Л. В.* Особенности развития нефтяной промышленности России на современном этапе / Л. В. Эдер, И. В. Филимонова, И. В. Проворная, Т. М. Мамахатов // Бурение и нефть. — 2016. — № 12. — URL: <https://burneft.ru/archive/issues/2016-12/3> (дата обращения: 25.10.2019).
23. *Belgrave, J. D. M.* A Comprehensive Approach to In-Situ Combustion Modeling / J. D. M. Belgrave, R. G. Moore, M. G. Ursenbach, and D. W. Bennion // SPE Advanced Technology Series. — 2013. — Vol. 1, Iss. 01. — P. 10.
24. *Charest, M.* Alkaline-Surfactant-Polymer (ASP) Flooding in Alberta small amounts of the right chemicals can make a big difference / M. Charest // Canadian Discovery Digest. — 2013. — Vol. 1. — P. 20–50.
25. *Qiao, Qi.* The pilot test of ASP combination flooding in Karamay oil field / Qiao Qi, Hongjun Gu, Dongwen Li, Ling Dong // SPE Paper No. 64726 presented at the 2000 SPE International Oil and Gas Conference and Exhibition, 7–10 November, Beijing, China. — Beijing, 2000.
26. *Sorbie, K. S.* Polymer improved oil recovery / K. S. Sorbie. — London : Blackie and Son, Ltd., 1991. — 359 p.
27. *Wever, D.* Polymers for enhanced oil recovery: a paradigm for structure property relationship in aqueous solution / D. Wever, F. Picchioni, A. A. Broekhuis // Progress in Polymer Science. — 2011. — Vol. 36 (11). — P. 1558–1628.

ДОБЫЧА ЖЕЛЕЗНОЙ РУДЫ

Сергей Николаевич Кизилев

Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики»,
научный сотрудник, кандидат технических наук

Антон Александрович Лиске

Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики»,
инженер

ВВЕДЕНИЕ

Среднее содержание железа в земной коре — 5,0%, оно является одним из наиболее распространенных элементов и входит в состав большого числа минералов (более 300). Главные промышленноценные минералы железа — оксиды и гидроксиды, в меньшей степени — карбонаты; это магнетит, титаномагнетит и гематит, а также мартит (псевдоморфоза гематита по магнетиту), гётит, гидрогётит (лимонит) и сидерит (табл. 3.1).

Таблица 3.1. Главнейшие минералы железных руд

Минерал	Химическая формула	Содержание железа, %
Магнетит	Fe_3O_4	72,4
Магномагнетит	$(\text{Mg, Fe})\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	65–68
Титаномагнетит*	–	55–67
Гематит	Fe_2O_3	70,0
Гётит	HFeO_2	62,9
Гидрогётит (лимонит)	$\text{FeO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	52,0–62,9
Сидерит	FeCO_3	48,3

* Магнетит с изоморфной примесью титана или гомогенный твердый раствор магнетита и ульвошпинели. К титаномагнетиту часто относят и ильменомангнетит — магнетит с ильменитовыми продуктами распада твердого раствора.

В зависимости от условий образования чрезвычайно разнообразен и минеральный состав железных руд, определяющий в значительной степени их промышленную ценность. Железные руды подразделяются на 11 основных промышленных типов (табл. 3.2).

По количеству общих и разведанных запасов железных руд Россия устойчиво занимает первое место в мире, полностью удовлетворяет свои потребности в железорудном сырье и значительные объемы товарных железных руд, концентратов, окатышей, горячебрикетированного железа ежегодно поставляет на экспорт.

Железорудные месторождения промышленного значения весьма разнообразны. Они известны в эндогенных, экзогенных и метаморфогенных комплексах пород. С учетом генезиса принято выделять следующие основные промышленные типы.

Таблица 3.2. Промышленные типы железных руд, их минеральный состав и элементы-примеси

Тип руд	Главные и характерные рудные минералы	Главные и характерные элементы-примеси в рудах	Типичные месторождения
Титаномагнетитовые и ильменит-титаномагнетитовые руды в ультраосновных и основных породах	Титаномагнетит, ильменит, магнетит, самородная платина и платиноиды	Ti, V, Sc, Cu, Co, Ni, S, Pt, Os и др.	Качканарское, Копанское, Первоуральское, Пудожгорское, Чинейское, Бушвельдский комплекс, Роутивара, Таберг, Аллард-Лейк (Лак-Тио)
Бадделеит-апатит-магнетитовые руды в ультраосновных щелочных породах	Магнетит, апатит, бадделеит	P, Zr, Nb, Ta	Ковдорское, Палабора
Магнетитовые руды в осадочных и вулканогенно-осадочных породах	Магнетит, гематит, мартит, пирротин, пирит, халькопирит, сфалерит, галенит, арсенопирит, висмутин, молибденит, кобальтин, линнеит, самородные золото и серебро, людовигит, ашарит	S, As, Co, Mn, Cu, Se, Te, Pb, Zn, Cd, In, Bi, Mo, Ag, Au, Ge, F, B, Pt, Pd	Соколовское, Сарбайское, Качарское, Высокогорское, Гороблагодатское, Абаканское, Шерегешевское, Таштагольское, Таежное, Десовское, Маркона, Чогарт, Чадор-Малю, Гольгохар, Мааншань
Магномагнетитовые руды в осадочных и пирокластических породах и траппах	Магномагнетит, магнетит, гематит, пирит, халькопирит, сфалерит, галенит	S, Cu, Zn, V, Au, Hg, B, Na	Коршуновское, Рудногорское, Тагарское, Нерюндинское, Капаевское
Магнетит-гематитовые и гематит-магнетитовые руды в вулканогенно-осадочных породах	Гематит, магнетит, псиломелан сидерит, пирит, сфалерит, галенит, браунит, гаусманит	Ge, Mn, Mo, Zn, Pb, Au, S, P, B, V	Западно-Каражальское, Холзунское
Железистые кварциты в осадочных и вулканогенно-осадочных породах	Магнетит, гематит, сидерит, пирит, сфалерит, галенит	Ge, Au, Mn	Оленегорское, Костомукшское, Криворожский бассейн, Курская магнитная аномалия, Тарыннахское, Горкитское
Мартитовые, мартитгидрогематитовые, гидрогематит-мартитовые и гидрогематитовые руды, образованные по железистым кварцитам	Мартит, гидрогематит, гётит, магнетит, гематит, пирит	U	Криворожский бассейн, Белозерское, Висловское, Яковлевское, Михайловское, Гостищевское
Сидеритовые и гематитсидеритовые руды в осадочных породах	Сидерит, гематит, сидероплезит	Mn	Бакальское, Березовское
Бурые железняки, образованные по сидеритам	Гидрогётит, гётит, сидерит	–	Бакальское, Березовское, Зигазино-Комаровская группа
Лептохлоритовые и гидрогётитовые оолитовые руды в осадочных породах	Гидрогётит, лептохлориты, псиломелан, пирролюзит, вивианит, вернадит, пирит	P, Mn, As, V, Bi	Лисаковское, Аятское, Керченский, Лотарингский железорудные бассейны
Хром-никелевые гётитгидрогётитовые руды кор выветривания ультраосновных пород	Гётит, гидрогётит, сидерит, нонтронит, пирит, хромшпинелиды, полианит, пирролюзит, псиломелан	Cr, Co, Ni, V, Mn, Sc, Ga	Серовское, месторождения Орско-Халиловского района, латеритные руды Кубы, Филиппин, Индонезии, Гвинеи, Мали

Магматические месторождения:

- а) титаномагнетитовые и ильменит-титаномагнетитовые, представляющие собой зоны концентрированной вкрапленности (с шлировыми и жило-линзобразными обособлениями) ванадий- и титансодержащих магнетитов в интрузивах габбро-пироксенитдунитовой, габбровой, габбро-диабазовой и габбро-анортозитовой формаций (Качканарское, Копанское, Первоуральское на Урале, Пудожгорское в Карелии, Чинейское в Читинской области, месторождения Бушвельдского комплекса в ЮАР, Роутивара, Таберг в Швеции, Аллард-Лейк (Лак-Тио) в Канаде и др.);
- б) бадделеит-апатит-магнетитовые, образующие серии линзо- и жилообразных тел в ультраосновных щелочных интрузивах с карбонатами (Ковдорское на Кольском полуострове, Палабора в Южной Африке).

На долю титаномагнетитовых и бадделеит-апатит-магнетитовых руд приходится 6,6% мировых разведанных запасов и 5,6% производства товарных руд. В России они составляют 12,9% в запасах и 18,2% в производстве товарных руд.

Метасоматические месторождения (месторождения скарново-магнетитовых руд) представлены в разной степени оруденелыми скарнами и скарноидами, образующими сложные пласто- и линзобразные залежи магнетитовых руд в осадочных, вулканогенно-осадочных и метаморфических породах (Соколовское, Сарбайское, Качарское в Казахстане; Высокогорское, Гороблагодатское и другие на Урале; Абаканское, Тейское в Красноярском крае; Шерегешевское, Таштагольское и другие в Горной Шории; Таежное, Десовское в Якутии; Маркона в Перу, месторождения Чилийского железорудного пояса; Чогарт, Чадор-Малю в Иране; Мааншань в Китае). На долю скарново-магнетитовых руд приходится 9,5% мировых разведанных запасов и 8,3% производства товарных руд. Руды данного типа в России составляют соответственно 12,2 и 12,9%.

Гидротермальные месторождения:

- а) генетически связанные с траппами и представленными жило-столбообразными и различной сложной формы залежами магномагнетитовых руд в осадочных, пирокластических породах и траппах (Коршуновское, Рудногорское, Нерюндинское, Капаевское, Тагарское в Восточной Сибири);
- б) гидротермально-осадочные сидеритовые, гематит-сидеритовые, представленные пласто-, жило- и линзобразными согласными и секущими залежами сидеритовых, гематит-сидеритовых (в верхних горизонтах окисленных) руд в осадочных породах (Бакальское рудное поле на Урале, Березовское в Читинской области, Уэнза, Бу-Кадра, Заккар-Бени-Саф в Алжире, Бильбао в Испании).

Доля руд данного типа в разведанных запасах и производстве товарных руд в мире незначительна и не превышает 1%, в России в запасах она составляет — 5,4%, в производстве товарных руд — 2,9%.

Вулканогенно-осадочные месторождения — согласные пласты и линзы гематитовых, магнетит-гематитовых и гематит-магнетитовых руд в вулканогенно-осадочных породах (Западно-Каражальское в Казахстане, Холзунское на Алтае). Доля руд данного типа в разведанных запасах и производстве товарных руд в мире незначительна. В России такие месторождения не разрабатываются.

Осадочные морские месторождения, образовавшиеся в морских бассейнах и представленные слабо дислоцированными пластовыми залежами лептохлоритовых и гидротитовых оолитовых руд в морских терригенно-карбонатных мезокайнозойских отложениях (Керченский железорудный бассейн на Украине, Аятское в Казахстане, месторождения бурых железняков Лотарингского железорудного бассейна (на территории Франции, Бельгии, Люксембурга), Великобритании, Германии, провинции Ньюфаундленд Канады и Бирмингемского района в США). Доля руд данного типа в разведанных запасах в мире составляет

10,6%, в производстве товарных руд — 8,9%. В России такие месторождения не разведаны и не обрабатываются.

Осадочные континентальные месторождения, образовавшиеся в речных или озерных бассейнах и представленные пластовыми и линзообразными залежами лепто-хлоритовых и гидрогётитовых оолитовых руд в ископаемых речных отложениях (Лисаковское в Казахстане). Доля руд данного типа в разведанных запасах и производстве товарных руд в мире незначительна. В России такие месторождения не разведаны и не обрабатываются.

Метаморфизованные железистые кварциты широко распространены на древних щитах, платформах и на некоторых срединных массивах фанерозойских складчатых областей. Большинство их имеет раннепротерозойский и архейский возраст; значительно меньше распространены позднепротерозойские и раннепалеозойские месторождения.

Железистые кварциты образуют огромных размеров железорудные бассейны. Рудные залежи кварцитов в пределах месторождений обычно имеют крупные размеры: километры по простиранию, первые сотни или десятки метров по мощности. Характерна пластообразная форма рудных тел, тонкополосчатые текстуры и сходный минеральный состав руд на различных месторождениях (Криворожский бассейн на Украине, в России — месторождения Курской магнитной аномалии, Оленегорское на Кольском полуострове, Костомукшское в Карелии, Тарыннахское и Горкитское в Якутии, в Австралии — бассейн Хамерсли, в Бразилии — район Каражас и «Железного четырехугольника», в США — район оз. Верхнего, в Канаде — Лабрадорский прогиб, в Китае — бассейн Аньшань-Бенси и др.). Крупные и уникальные по запасам месторождения, легкая обогатимость руд, возможность разработки открытым способом большими карьерами с применением мощной горнодобывающей и транспортной техники позволяют считать их благоприятными объектами добычи железных руд во всех бассейнах мира. Доля руд данного типа в разведанных запасах и производстве товарных руд в мире превышает 60%, в России в запасах она составляет — 55,9%, в производстве товарных руд — 64,5%.

Месторождения кор выветривания, представленные богатыми гидрогематит- и сидерит-магнетитовыми, мартит-магнетитовыми рудами, формируются при преобразовании железистых кварцитов в результате гипергенных процессов. В соответствии с этим в своем распространении они связаны с районами и площадями развития железистых кварцитов, приурочены к развивающимся по ним площадным и линейным корам выветривания (Михайловское, Яковлевское, Гостищевское, Висловское, Разуменское в России, месторождения богатых руд Кривого Рога на Украине, железорудные районы Австралии, Бразилии, Индии, США). На долю месторождений данного типа приходится 12,5% разведанных запасов России и 1,3% производства товарных руд. В сумме доля месторождений двух последних типов — железистых кварцитов и развивающихся по ним полигенных богатых железных руд — составляет в мире 70,9% разведанных запасов и 74,4% производства товарных руд, т. е. это наиболее важные промышленные типы месторождений. Доля руд двух последних типов месторождений в России составляет в запасах 68,4%, в производстве товарных руд — 65,8%.

Прочие гипергенные железные руды:

- а) бурые железняки, связанные с корами выветривания сидеритов (Бакальская и Зигазино-Комаровская группы месторождений на Урале, Березовское в Читинской области);
- б) прерывистые плащеобразные залежи хром-никелевых гётит-гидрогётитовых руд, распространенные в коре выветривания ультраосновных пород (латеритные руды Кубы, Филиппин, Индонезии, Гвинеи, Мали, на Урале — Серовское и месторождения Орско-Халиловского района). Такие руды, как правило, легированы никелем и кобальтом.

Доля прочих гипергенных железных руд в разведанных запасах в мире составляет 2,4%, в производстве товарных руд — 2,0%, в России соответственно 1,1 и 0,2%.

ПРЕДПРИЯТИЯ РОССИИ ПО ДОБЫЧЕ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД

Россия занимает второе место в мире по запасам железной руды, уступая только Бразилии. Запасы категорий А + В + С₁ + С₂, учтенные «Государственным балансом полезных ископаемых. Железные руды», по состоянию на 01.01.2016 достигают 110 млрд т, ресурсы наиболее достоверной категории Р₁ оцениваются в 95,4 млрд т. При этом качество железорудного сырья в России заметно ниже, чем в других странах, обладающих значительными запасами этого сырья (например, Бразилии, Австралии и Индии).

Основу российской железорудной базы составляют железистые кварциты (более 52% запасов категорий А + В + С₁ от запасов железных руд Российской Федерации), руды со средним содержанием железа общего около 34% и требующие обогащения. Запасы месторождений, богатых гематит-сидерит-мартитовых руд, Курской магнитной аномалии составляют около 30 млрд т (категорий А + В + С₁ + С₂), но из-за сложных условий залегания только шестая их часть может быть вовлечена в разработку.

Руды титаномагнетитового промышленного типа занимают второе место в российской сырьевой базе железных руд (более 15% запасов категорий А + В + С₁ страны). Руды преимущественно бедные — среднее содержание железа общего около 17%. По масштабу запасов титаномагнетитовых руд Уральская железорудная провинция не имеет аналогов в мире.

Руды магнетитового промышленного типа составляют около 14% запасов категорий А + В + С₁ России (8,4 млрд т). Руды их, как правило, легкообогатимы и отличаются сравнительно высоким содержанием железа общего (среднее содержание 33,1%). Большая часть запасов месторождений магнетитовых руд скарного типа разведана в Сибирском федеральном округе в Горной Шории, Кузнецком Алатау и Горном Алтае. На территории округа запасы категорий А + В + С₁ составляют 12,6% от общих запасов, добыча — 4,4% от добычи по России.

Руды остальных промышленных типов занимают значительно меньшую долю в сырьевой базе железных руд России. С учетом прироста в результате геологоразведочных работ, добычи и потерь при добыче запасы железных руд категорий А + В + С₁ в 2014 г. выросли относительно предыдущего года на 908 млн т, или на 1,5%; динамика запасов категории С₂ показала более существенный рост — на 2,5 млрд т, или на 5,3%.

Россия занимает пятое место в мире по добыче железорудного сырья. Добыча сырых железных руд в 2016 г. составила 298,1 млн т, что на 0,1% больше, чем в 2015 г.

По запасам и добыче в России основным регионом является Центральный федеральный округ, на долю которого приходится 57,7% всех запасов категорий А + В + С₁ и 54,9% добычи.

Четыре холдинга контролируют около 80% российского производства железорудного сырья и более 60% лицензированных запасов железных руд. ООО УК «Металлоинвест» занимает ведущие позиции в железорудной отрасли России и СНГ. Холдинги «Евраз-Груп С. А.», ПАО «НЛМК» и ПАО «Северсталь» по производственным мощностям более чем вдвое уступают лидеру отрасли.

Характеристика основных месторождений железных руд и перечень эксплуатирующих их предприятий представлены в табл. 3.3.

Таблица 3.3. Основные месторождения железных руд России и перечень эксплуатирующих их предприятий

№ на карте	Регион	Месторождение	Геолого-промышленный тип
1	Белгородская область	Стойло-Лебединское	Магнетитовый в железистых кварцитах
		Лебединское	
		Стойленское	Гематитмагнетитовый в железистых кварцитах
		Коробковское	Магнетитовый в железистых кварцитах
		Приоскольское	
		Яковлевское	Гематит-сидерит-мартитовый
		Гостищевское	
Висловское			
2	Курская область	Михайловское	Гематит-магнетитовый в железистых кварцитах
3	Республика Карелия	Костомукшское	Магнетитовый в железистых кварцитах
		Корпангское	
4	Мурманская область	Ковдорское	Бадделейт-апатит-магнетитовый
5	Челябинская область	Суроямское	Ванадиево-титано-магнетитовый
6	Свердловская область	Гусевогорское	Ванадиево-титано-магнетитовый
		Собственно-Качканарское	
7	Кемеровская область	Шерегешевское	Магнетитовый в скарнах
		Таштагольское	
		Казское	
8	Иркутская область	Рудногорское	Магнетитовый в скарнах
9	Забайкальский край	Чинейское	Титаномагнетитовый
10	Республика Саха (Якутия)	Десовское	Магнетитовый в железистых кварцитах
		Таежное	
		Тарыннахское	
		Горкитское	
11	Амурская область	Гаринское	Магнетитовый в скарнах
12	Еврейская АО	Кимканское	Магнетитовый в железистых кварцитах
		Сутарское	

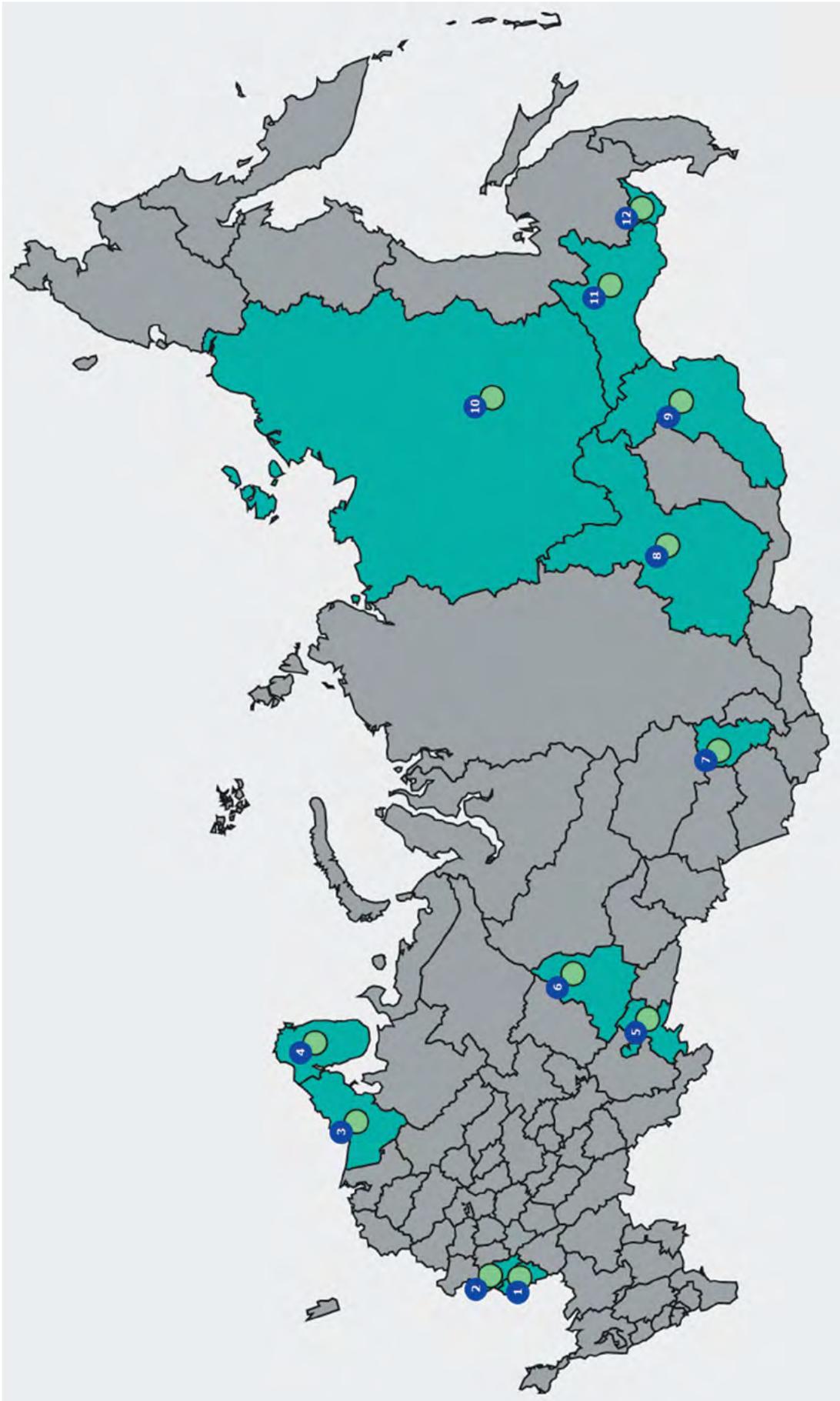


Рис. 3.1. Карта-схема расположения месторождений железных руд Российской Федерации

ИСТОРИЯ ЗАРОЖДЕНИЯ ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ ОТРАСЛИ

Зарождение железорудной отрасли в мире

В первобытные времена горное дело ограничивалось примитивной добычей кремния. Месторождения металлических руд в Сирии и Греции (возле мыса Тенар) разрабатывались еще финикийцами. Интенсивная добыча полезных ископаемых велась ими на Кипре. В Испании и Британии они выступали преимущественно как торговцы металлами. Первые горные разработки в Испании начали проводиться карфагенянами. В Малой Азии в горном деле преобладали древние местные традиции: главным полезным ископаемым являлась железная руда. В целях упорядочения и дальнейшего развития горного дела греки первыми разработали соответствующие правовые нормы, объявив, в частности, горные рудники государственной собственностью, которая могла сдаваться в аренду, как правило, мелкими участками (в Афинах — сроком на 3 года, при закладке новых шахт — сроком на 10 лет). В остальных случаях рудник принадлежал землевладельцу, на земле которого он находился, и его эксплуатация регламентировалась земельным правом. Основным горнорудным центром Древней Греции являлся район Лавриона. Достигнутые здесь ок. 490 г. до н. э. успехи в добыче полезных ископаемых способствовали превращению Афин в морскую державу и усилению их оборонной мощи в войне против Персии. Увеличение добычи достигалось за счет использования труда больших масс рабов. Во время спартанского наступления в 413 г. до н. э. многим из них удалось бежать. Восстановление Лаврионского месторождения в IV в. до н. э. было длительным и трудным.

Развитие горного дела в Македонии, начавшееся ок. 350 г. до н. э. в рудниках возле Филипп, повлекло за собой в III в. до н. э. резкий упадок горнорудного дела в Греции, усугублявшийся тем фактом, что маломощные пласты руд возле Коринфа и на Эвбее давно были исчерпаны. Основным и наиболее распространенным античным способом добычи полезных ископаемых являлась прокладка большого количества узких штолен (1,5 × 2 м) с короткими подземными штреками. Главное же техническое достижение древних греков в горном деле заключалось в их искусстве обогащения добытых руд. К основным орудиям труда, применявшимся в шахтах глубиной 120 м, относились кайло, горный молоток и кирка. Для вентиляции пробивались специальные узкие штольни размером примерно 50 × 50 см. Выемка горных пород производилась исключительно ручным способом, поэтому здесь использовался преимущественно труд рабов. Кроме них, в забоях работало (подтверждается дошедшими до нас надписями) некоторое количество квалифицированных и хорошо оплачиваемых рудокопов. Горное дело в Афинах играло значительную роль в жизни общества. Существовали специальные суды для разбирательства спорных вопросов, связанных с горным делом (но не с гражданскими делами самих рудокопов); приобретение прав на эксплуатацию того или иного рудника подлежало обнародованию; сами афинские граждане могли вносить предложения по улучшению горнорудного производства. Дошедшие до нас изображения труда рудокопов, сохранившиеся на глиняных сосудах, найденных возле Коринфа и относящихся примерно к 520 г. до н. э., показывают лишь раннюю стадию античного горного дела. Первыми древними правителями, которые начали приговаривать своих политических противников в качестве наказания к работе в рудниках, расположенных в Нубийской пустыне, были Птолемеи. Этруски вели открытую разработку богатых железорудных месторождений на берегах Эльбы. Их рудники (глубина штолен достигала 120 м) располагались возле Волатерры. Этрусков отличал высокий уровень обработки металлов.

Римское горное дело основывалось, как правило, на эксплуатации рудных месторождений на землях подвластных народов, сначала на Сардинии, а затем в Испании. Многие из иберийских специальных терминов и выражений были заимствованы в латинский язык. Горное дело получило в Древнем Риме свое дальнейшее развитие как организационно, так и технически. Уже около 180 г. до н. э. римляне использовали в рудниках близ Картахены труд свыше 40 тысяч рабов и примерно такое же количество рабочей силы на месторождениях на берегах р. Рио-Тинто. Для механизации отдельных производственных процессов в штольнях

глубиной от 80 до 100 м стали применять технические устройства: водоподъемные машины, оси, элементом которых являлся винт Архимеда, установленный на разных уровнях водоподъемного колеса, лебедки, ворота и подъемники. В императорскую эпоху горнорудной область управлял назначавшийся императором прокуратор, иногда императорский вольноотпущенник. Учет, отчетность и ведение кадастра возлагались на вольноотпущенника или раба. Их основные функции заключались во взимании налогов и пошлин. Одновременно они могли также отдавать распоряжения производственно-технического характера, предписания по «технике безопасности» или распоряжения о расширении шахт и их эксплуатации. Это подтверждают две надписи, найденные в Випаске и свидетельствующие, в частности, о том, что во времена Адриана (117–138 гг. н. э.) в горном деле было задействовано большое количество арендаторов рудников, вносящих плату в казну императора. Кроме того, в шахтах использовались в качестве рабочей силы арестанты, осужденные как «*servi roepae*» («наказанные рабы») к работам в рудниках за совершенные ими одного из 22 видов преступлений. Такому же наказанию подвергались позднее многие христиане, например римский епископ Каликст. Договоры о найме рабочей силы на золотоносных копях в Дакии, относящиеся ко II в. н. э., также свидетельствуют о наличии свободных рудокопов. В IV в. н. э. произошло резкое сокращение добычи железных руд. В этот период римские власти пытались узаконить обязательное наследование горной профессии (*metallis adscripti*), лишив тем самым детей рудокопов права выбора занятия по своему усмотрению. Это привело к бегству части рабочей силы, а в отдельных случаях — к восстаниям (например, бессов в 376–378 гг. н. э.). В литературе и поэзии горное дело почти не нашло отражения. Также отсутствует античная символика горняцкого труда, за исключением монет, бывших в обращении в Далмации, Паннонии и Норике. Сохранилось описание марказитового рудника, сделанное Галеном. Ценную информацию дали археологические раскопки античных рудников в Лаврионе, Дакии, Далмации, Норике, Британии и Испании. Так, в штольнях Эмилия возле Валлерфангена (Саар) найдена надпись, относящаяся примерно к 300 г. н. э., которая содержала правовые положения, идентичные горным уставам средних веков.

Зарождение железорудной отрасли в России (СССР)

Добыча железной руды и получение из нее железа известны с древних времен. Способ получения железа из руды (сыродутный процесс), по-видимому, был открыт в Малой Азии в конце 3-го — начале 2-го тыс. до н. э. Почти весь период 2-го тыс. до н. э. железодельная индустрия ограничивалась обслуживанием сакральных сфер жизни. Лишь с последних веков этого тысячелетия в областях Малой Азии, Закавказья и Передней Азии железо постепенно становится основным материалом для изготовления орудий труда и оружия.

Развитие железорудной промышленности на Руси — распространение металлургии железа на территории современной России — относится к концу 2-го — началу 1-го тыс. до н. э. Племена, населявшие центральную и северную лесные области Европейской части России, были знакомы с металлургией железа с VIII–VII вв. до н. э. В степях Северного Причерноморья, где в VII–IV вв. до н. э. обитали племена скифов, обнаружены следы металлургического производства на Каменском городище, близ Некополя; там было найдено большое количество остатков железодельных и кузнечных промыслов. В большинстве районов Восточной Азии, в Южной Сибири и на Алтае железные изделия широко распространяются в IV–III вв. до н. э. Первые признаки железорудного дела в Африке появляются в это же время, хотя в целом большинство народов этого континента узнали железо лишь в эпоху Средневековья. В средние века распространились железодельные народные промыслы в Карелии, Тихвине, Каргополе, Новгороде, Череповце, Устюжне, затем в районе Тулы и др. Железо получали сыродутным способом из бурого железняка в домницах и горнах. К XVI в. относится зарождение доменного производства, с XVII в. возникают горные предприятия промышленного типа. В 1632 г. построен Городищенский железодельный завод в районе Тулы. Тульский железорудный район на базе Тульского и Липецкого

месторождений бурых железняков и сидеритов — первая сырьевая база металлургии в Центральной России.

Развитие железорудной промышленности как отрасли началось лишь в первой половине XVIII в. До середины XVIII в. в основном добывались руды с малым содержанием фосфора, что сдерживало рост железорудной промышленности. Изобретение основных способов выплавки железа (англичанин Г. Бессемер, 1856; француз П. Мартен, 1864; англичанин С. Дж. Томас, 1878) позволило добывать и перерабатывать руды с большим содержанием фосфора. В начале XVIII в. быстро развивается железорудная промышленность на Урале: в это время действует около 70 железоделательных заводов. В 1721 г. пущен Высокогорский железный рудник, а затем Гороблагодатский и Бакальский рудники. Развитие железорудной промышленности на юге России началось с постройки Луганского металлургического завода (1795). Близкое расположение топливной и рудной баз в Донбассе выводят юг России на первое место в металлургическом производстве. В 1881 г. началась массовая разработка железных руд в Кривбассе. Железорудная промышленность дореволюционной России являлась слабо развитой отраслью горной промышленности. На подземных и открытых работах преобладали ручной труд (бурение, погрузка, откатка) и конная тяга. Максимальная добыча железной руды (1913) 9,2 млн т; средняя годовая мощность рудника 21 тыс. т руды; мощность наиболее крупных рудников в Кривбассе 100–200 тыс. т. Производительность труда одного рабочего 94–270 т руды в год.

Новый этап в развитии железорудной промышленности наступил после Октябрьской революции 1917 года. Быстрыми темпами восстанавливаются и реконструируются рудники, разрушенные во время Гражданской войны и военной интервенции 1918–1920 гг., строятся новые. На шахтах внедряются компрессорные установки, новые подъемные и водоотливные машины, механизуются горные работы, применяются эффективные системы разработки с магазинированием руды, слоевым и этажным обрушением. На карьерах внедряются гидравлические, дренажные и экскаваторные работы, ударно-канатное и вращательное бурение, паровозный железнодорожный транспорт; для отбойки руды применяют массовые взрывы. В Кривбассе появились шахты с производительностью 1,5–2 млн т руды в год («Гигант», им. С. М. Кирова, им. Карла Либкнехта, им. Коминтерна, им. Г. К. Орджоникидзе и др.). Основной сырьевой базой черной металлургии страны предвоенных лет становится Криворожский железорудный бассейн (1/2 общесоюзной добычи железной руды). Во второй половине 30-х гг. быстрыми темпами осваиваются месторождения восстановленных районов. На базе построенного в 1931 г. Магнитогорского рудника, месторождений Хакасии, Горной Шории создается новая угольно-металлургическая база страны — Урало-Кузнецкий металлургический комбинат. Удельный вес добычи железной руды восстановленных районов в 1940 г. — 33% общесоюзной добычи (19,6% в 1913 г.). Производительность труда рабочего на рудниках возросла в 5 раз (по сравнению с 1913 г.). В годы Великой Отечественной войны 1941–1945 гг., в период оккупации железорудных районов Юга, интенсивно растет добыча железной руды на Урале, в Казахстане и Сибири, что обеспечило потребности страны в металле для нужд фронта. В 1946–1950 гг. восстановлены и реконструированы железорудные предприятия Юга (Криворожского и Керченского бассейнов). В начале 50-х гг. в центре страны, в бассейне Курской магнитной аномалии, осваиваются месторождения богатых железных руд (Лебединский и Михайловский горно-обогадительные комбинаты (ГОК)) и железистых кварцитов (рудник им. И. М. Губкина). Железорудная промышленность страны в основном основывалась на добыче и переработке преимущественно богатых железных руд, запасы которых ограничены, что сдерживало ее дальнейшее развитие. В середине 50-х гг. начался новый этап в развитии отечественной железорудной промышленности — вовлечение в эксплуатацию разведанных запасов бедных магнетитовых руд (железистых кварцитов), после обогащения которых получают высококачественные железорудные концентраты (содержание железа свыше 60%). Этот период характеризуется концентрацией производства, опережающим ростом открытой добычи, повышением качества товарной продукции, началом строительства крупнейших ГОКов с высокомеханизированными и автоматизированными технологическими процессами производства.

В послевоенный период существенно изменилось географическое размещение разведанных запасов железных руд: возросли запасы руд в центральном, северо-западном и восточном районах страны. По количеству балансовых запасов железных руд СССР занимал первое место в мире (свыше 100 млрд т, 1980), располагая надежной сырьевой базой для обеспечения потребностей черной металлургии. Основные железорудные базы Европейской части СССР: Криворожский железорудный бассейн (Кривбасс) и Курская магнитная аномалия, на долю которых приходилось, соответственно, 23,4 и 27,9% запасов руд. Рудами Криворожского и Кременчугского бассейнов снабжались заводы Приднепровья, Донбасса и других районов. Бурые железняки Камыш-Бурунского железорудного комбината (Керченский железорудный бассейн) служили основной рудной базой завода «Азовсталь». Металлургические предприятия центра страны (Новолипецкий, Новотульский заводы и строящийся в то время Оскольский электрометаллургический комбинат) обеспечивались рудами КМА, обладающей значительными запасами богатых (до 65% железа) и бедных магнетитовых руд. В 1981 г. производство товарной руды (16% от производства ее в СССР) осуществлялось главным образом за счет действующих с начала 70-х гг. Михайловского, Лебединского ГОКов и строящегося Стойленского с открытой добычей руды (годовая мощность каждого 24–48 млн т сырой руды). Основные запасы богатых руд залегают на большой глубине (св. 700 м) в сложных горно- и инженерно-геологических условиях. Возводится опытно-промышленный Яковлевский рудник по добыче этих руд. Рудной базой Череповецкого и других металлургических заводов являются бедные магнетитовые руды Оленегорского, Ковдорского, Костомукшского месторождений Кольского полуострова. Для обеспечения металлургических заводов Урала, Сибири значительно расширена рудная база восточных районов страны. На Урале действуют Качканарский горно-обогатительный комбинат, Северо-Песчанская шахта, наращивают добычу Высокогорское и Гороблагодатское рудоуправления. В Казахстане, в Кустанайском железорудном районе, для снабжения Магнитогорского металлургического комбината (в связи с исчерпанием рудных запасов г. Магнитная), заводов Южного Урала, Карагандинского металлургического завода построены Соколовско-Сарбайский горно-обогатительный комбинат, Лисаковский ГОК, строится Качарский ГОК, ширится разработка Атасуйского железорудного района, осваивается Коржинкольское месторождение. Рудной базой металлургических заводов Сибири (Западно-Сибирского и Кузнецкого) являются Коршуновское и Рудногорское месторождения Ангаро-Илимского железорудного бассейна (Коршуновский ГОК), а также предприятия Горной Шории (Кемеровская обл.), Красноярского края (Краснокаменское и Ирбинское рудоуправления), Хакасии (Абаканское рудоуправление), разведанные месторождения в Алтайском крае (Белорецкое, Инское и Холзунское). На востоке страны сырьевой базой являются месторождения Южно-Алданского района (Таежное, Десовское) и Чаро-Токкинского железорудного района в Южной Якутии, Гаринское (Амурская обл.), и Кимканское (Хабаровский край) месторождения, выгодно расположенные по отношению к южно-якутским коксующимся углям.

Производство железорудных предприятий (рис. 3.2) — товарная руда — представлена концентратом и природно-богатой рудой (агломерационной и кусковой).

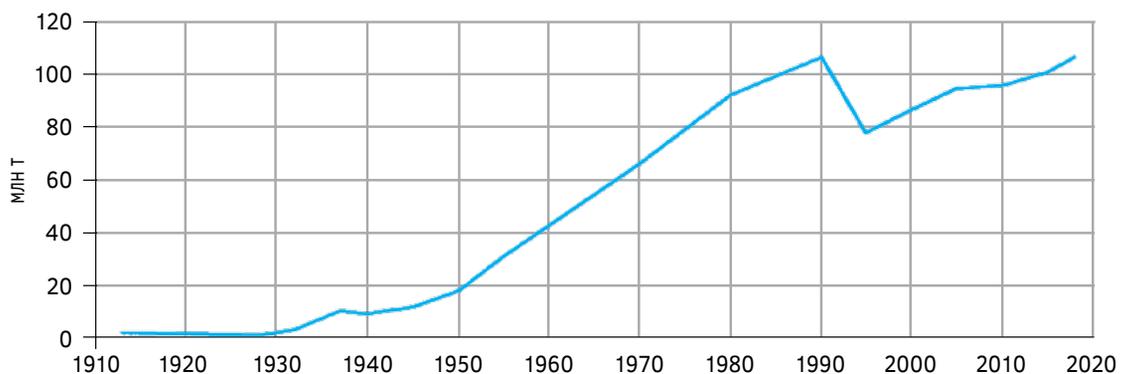


Рис. 3.2. Добыча железной руды в РСФСР и России

Из концентрата и агломерационной руды производят подготовленное к плавке сырье: агломерат и окатыши. В связи с ростом добычи бедных руд содержание железа в сырой руде снизилось в среднем с 44,5% (1960 г.) до 34,7% (1980 г.), а его содержание в товарной руде повысилось, соответственно, с 54,3% до 59,3%. Доля концентратов в товарной руде увеличилась с 38% (1960 г.) до 72% (1980 г.), а содержание железа в концентрате возросло с 55,1% до 61,5%. Около 42% объема железорудного концентрата содержит железа 65% и выше. С 1954 г. СССР занимал первое место в мире по производству агломерата: 151,3 млн т с содержанием железа 52,3% (1980 г.). Производство окатышей (впервые начато в 1965 г. на Соколовско-Сарбайском ГОКе) составило 51 млн т с содержанием железа 61,3% (1980 г.). За 1960–1980 гг. средняя производственная мощность горного предприятия по добыче сырой железной руды увеличилась с 1,35 до 6,8 млн т, в т. ч. карьера и шахты, соответственно, в 5 и 2 раза, добыча сырой руды выросла в 3,4 раза и составляла около 500 млн т (первое место в мире), удельный вес добычи открытым способом — с 57,1% до 84,6%.

Глубина горных работ достигла на шахтах более 1000 м (Кривбасс) и на карьерах 300 м (Кривбасс, Урал, Казахстан) при проектных глубинах, соответственно, 1200–1300 м и 500–700 м. Подземная разработка железных руд осуществляется 40 шахтами, из них 13 имеют производительность свыше 2,5 млн т каждая. Более 66% товарных руд подземной добычи производится в Кривбассе, 17% — на Урале и в Казахстане, 10% — в Сибири. В связи с ростом глубинной разработки железорудных месторождений проведены коренная реконструкция и техническое перевооружение железорудных предприятий и шахт, в результате чего средняя годовая производительность труда одного работающего на подземной добыче руды достигла 2300 т. Все шире используются системы разработки с обрушением руды и вмещающих пород (69%), очистные работы на сдвоенных этажах с перепуском руды на концентрационный горизонт, механизация добычных и вспомогательных процессов. На выпуске и доставке руды применялись виброустановки и самоходные погрузочно-доставочные машины, на проходке горизонтальных выработок — комплексы горных машин и др., на проходке вертикальных выработок — комбайны, на взрывных работах — машины по механизированной зарядке скважин.

Открытая разработка руд осуществляется на 60 карьерах, из них 15 мощностью каждый 10–48,5 млн т сырой руды в год обеспечивают 73% объема открытой добычи. Удельный вес добычи сырой руды на карьерах в основных районах страны (%), 1980 г.): Украина — 47,1, Центр Европейской части СССР — 15,4, Северо-Запад Европейской части — 6,7, Урал — 14,2, Казахстан — 9,6, Сибирь — 6,3. На карьерах используются мощное высокопроизводительное буровое, погрузочное и транспортное оборудование, передовая технология и организация работ. Средняя производительность труда одного работающего на добыче сырой руды 7500 т в год (1980 г.). При бурении скважин 92% объема работ выполняется станками шарошечного бурения (диаметр скважин 250–320 мм), погрузка горной массы — экскаваторами-мехлопатами и драглайнами вместимостью ковша 4,6–16 м³, роторными комплексами производительностью 5 тыс. м³/час. Доставка горной массы в основном железнодорожным (53%) и автомобильным (41,2%) транспортом, в меньшем объеме конвейерным и гидравлическим транспортом. Основные тяговые средства на железнодорожном транспорте: тяговые агрегаты (цепной вес до 360 т), электровозы (100–180 т), тепловозы мощностью 1472 кВт. Перевозка — в думпкарах (грузоподъемностью от 80 до 180 т), автосамосвалах (27–120 т). На взрывных работах применяются механизированные комплексы по приготовлению, доставке и зарядке скважин ВВ. В связи с увеличением глубины разработки на многих карьерах широко внедряется циклично-поточная технология, основанная на доставке горной массы с нижних горизонтов карьеров на поверхность конвейерным транспортом с шириной ленты 2000 м, производительностью одной линии 20 млн т руды и более в год и обеспечивающая эффективную отработку месторождения (Новокриворожский, Ингулецкий, Северный, Южный, Оленегорский ГОКи и др.).

Технология обогащения магнетитовой руды предусматривает многостадийное дробление, измельчение, магнитную сепарацию, дешламацию. Для вовлечения в эксплуатацию значительных запасов слабомагнитных руд (окисленных кварцитов) разработана технология их обогащения в сильном магнитном поле (Михайловский горно-обогатительный комбинат). Обогатительные фабрики оснащаются высококачественным оборудованием большой единичной мощности: дробилки, мельницы самоизмельчения (диаметром 9 м, объем 160 м³), шаровые мельницы (объем 82 и 140 м³) и др.; магнитные сепараторы (производительность 250 т/ч); гидроциклоны (диаметр 350–1400 мм); магнитные дешламаторы; вакуум-фильтры. На окомковательных фабриках устанавливаются обжиговые машины конвейерного типа (Лебединский, Северный, Михайловский ГОКи, Костомукшский горно-обогатительный комбинат) и специальная печь (Полтавский горно-обогатительный комбинат). Технический прогресс при добыче и подготовке руд обеспечивается внедрением на предприятиях автоматических систем управления как отдельными технологическими процессами, так и производством в целом (например, АСУ карьерным автотранспортом на Ингулецком и Ковдорском ГОКах, АСУ производством окатышей на Северном и Полтавском ГОКах), комплексной системы управления качеством продукции (Соколовско-Сарбайский, Ингулецкий, Михайловский ГОКи и др.).

ЦИКЛЫ РАЗВИТИЯ ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ ОТРАСЛИ

Железорудная промышленность — одна из древнейших областей деятельности человека по освоению недр Земли. Она зародилась в глубокой древности с возникновением человеческого общества и развивалась на базе совершенствования орудий производства; включает в себя все виды техногенного воздействия на земную кору, главным образом, извлечение руды и ее первичную переработку. На протяжении долгого времени непрерывно изобретались и совершенствовались орудия труда человека. Ранние периоды истории железорудной промышленности протекали в разных регионах в различное время. Наиболее достоверные сведения и ранние по времени археологические источники культур периода железных орудий находим в странах античного мира, Малой и Средней Азии, в Закавказье, Западной Европе, Китае, Японии.

Возникновение железорудного промысла и ремесла, перерастание их в промышленность начались в странах Переднего Востока, античного мира, Западной Европы и др. С древнейших времен известна разработка руд шахтным и открытым способами. В 70-е гг. прошлого века железорудная промышленность перерастает в гигантскую по масштабам и в комплексную по содержанию область производства.

Следует отметить экспоненциальный характер развития техники и технологий железорудной промышленности: на протяжении сотен тысяч лет их эволюция двигалась микроскопическими темпами, и только последние два столетия ознаменовались взрывным характером развития. Произошла научно-техническая революция, позволившая от ручной добычи перейти к комбинированным машинам, а затем — на автоматику и роботов, обеспечить безлюдную выемку полезных ископаемых (табл. 3.4, 3.5).

Главным фактором развития производительных сил в античном обществе стало освоение производства железа. Добыча руд и производство металлов относились к наиболее развитым и прибыльным отраслям хозяйства греко-римской цивилизации. С развитием феодальных отношений начинается широкое развитие железорудной промышленности в Центральной Европе, применяется ручное бурение горных пород. Важные усовершенствования в железорудной промышленности были сделаны в Европе в XV–XVI вв. Применение конного привода и водяного колеса для рудничного подъема, а также для водоотливных устройств позволило вести горные работы на глубине до 150 м. Начали

применяться взрывные технологии добычи. Вводится мокрое обогащение, что позволяет вести разработку сравнительно бедных руд. В 1512 г. в Саксонии была выдана привилегия на мокрую толчею. В это время в рудниках начинают устраивать деревянные настилы для перемещения по ним тележек с полезным ископаемым. Появляются первые горные училища и руководства по горному делу («12 книг о металлах» Г. Агриколы, 1556). В железорудной промышленности нашли применение паровые машины, первоначально для откачивания воды (Т. Ньюкомен в 1711–1712), затем и для рудничного подъема.

Таблица 3.4. Характеристика технологических циклов развития железорудной промышленности

Период	Цикл	Определяющий признак	Орудия производства
До 1-го тыс. н. э.	Первый (ранний железный век)	Поверхностные и подземные выработки в теле полезного ископаемого для добычи руд. Огневые работы. Механический вруб	Кирки, клинья, молоты, колесные механизмы, механические приспособления для шахтного подъема и водоотлива
Со второй половины 1-го тыс. н. э. — до XVIII в.	Второй (цикл гидросиловых установок)	Разветвленные сети подземных выработок для добычи руд. Искусственное проветривание. Упорядоченные в пространстве и во времени шахтные выработки для добычи руды. Прообраз шахтных систем разработки руд. Порохостроительные работы	Примитивные механизмы для обогащения шахтного подъема, водоотлива, горные машины с приводом от водяного колеса, конной тяги, рельсовые вагонетки, устройства для систем вентиляции
XVIII–XIX вв.	Третий (цикл паровых двигателей)	Механизированное бурение скважин, аналитически рассчитанные системы подземной разработки, многоуступная открытая разработка. Взрывные работы. Гидромеханизация	Выемочные горные машины, одноковшовые и многоковшовые экскаваторы, буровые станки, врубовые машины, транспортные машины с паровым и электрическим приводами, конвейеры, взрывобезопасные светильники
С начала XX — до середины XX в.	Четвертый (цикл электродвигателей и двигателей внутреннего сгорания)	Системы механизированных и открытой подземной разработок и обогащения руды, системы скважинной добычи. Шахтная гидродобыча	Высокопроизводительные экскаваторы, горные комбайны, установки глубокого бурения, турбобур, электробур, подземные самоходные машины, комплексы обогатительного оборудования
С 1950-х гг.	Пятый (информационно-технологический)	Переход от комплексной механизации к автоматизации технологических процессов добычи и комплексному освоению недр	Автоматизированные комплексы горных и обогатительных машин, установки сверхглубокого бурения, циклично-поточное и поточное производство

Таблица 3.5. Основные этапы циклов развития железорудной промышленности

Цикл	Научно-технический этап	Технико-экономический этап	Экономическо-социальный этап	Социально-регуляторный этап
Первый (ранний железный век)	Появление механических и осветительных приспособлений для добычи руды	Освоение производства железа	Рост потребления железа в различных отраслях хозяйства	Рост численности рабочих, занятых в тяжелых условиях труда
Второй (цикл гидросиловых установок)	Применение конного привода и водяного колеса для рудничного подъема	Увеличение объемов добычи руды	Добыча железной руды — развитая и прибыльная отрасль хозяйства	Появление первых горных училищ и руководств, рост численности и квалификации рабочих при сохранении тяжелых условий труда
Третий (цикл паровых двигателей)	Применение паровых машин	Увеличение объемов добычи руд, развитие открытой добычи	Активное развитие промышленности	Рост численности и квалификации работников, улучшение условий труда
Четвертый (цикл электродвигателей и двигателей внутреннего сгорания)	Применение комбинированных горных машин	Увеличение объемов и производительности добычи руды, развитие обогащения руды	Высокий спрос на продукцию железорудной отрасли	Рост квалификации работников, улучшение условий труда
Пятый (информационно-технологический)	Применение автоматизированных горных машин и комплексов	Увеличение производительности добычи руды	Контроль управления основными технологическими процессами, охрана окружающей среды от влияния горных работ	Сокращение численности работников, переход работников на удаленное управление процессами добычи

С эпохи промышленного переворота (конец XVIII — начало XIX в.) осуществляется переход к широкому применению в горном деле машин. В 1815 г. англичанин Г. Дэви изобретает безопасную рудничную лампу. Совершенствуется техника бурения, все шире применяются взрывчатые вещества, вводится рельсовая откатка с конной тягой. В 1930-х гг. начинают применять стальные канаты для рудничного подъема и откатки.

Высокий спрос на продукцию железорудной промышленности со стороны все более расширяющегося производства в XIX в. способствовал превращению железорудной промышленности в одну из крупнейших отраслей капиталистического хозяйства.

Интенсивно развивалась техника проходки стволов шахт. Усовершенствованные методы проходки, вентиляции и водоотлива позволили увеличить глубину разработок. Были созданы высокопроизводительные системы разработки рудных месторождений, введен электрический привод для подъемных машин, насосов, вентиляторов, рудничного транспорта; осуществлена механизация зарубки с помощью врубовых машин и др. Возникли научно-технические дисциплины, занимающиеся вопросами добычи отдельных видов руд.

В начале XX в. продолжился рост железорудного производства. С 1901 г. по 1913 г. добыча железной руды — с 6,2 до 9,2 млн т.

Новый цикл в развитии железорудной промышленности связан с научно-технической революцией (вторая половина XX в.) и характеризуется автоматизацией процессов горного производства и созданием системы горных наук. Научно-техническая революция превратила науку в непосредственную производительную силу, что привело к внедрению комплексной автоматизации горного производства, контроля и управления основными технологическими процессами, охраны окружающей среды от влияния горных работ.

Эволюция технологий добычи железной руды

Стоит отметить, что каждый цикл обусловлен определенным этапом, который дает новый толчок к развитию технологий. Последовательное прохождение всех этапов приводит к завершению цикла развития отрасли, после чего цикл повторяется (рис. 3.3).

Ресурсоэффективность в рамках исторического развития отраслей промышленности рассматривается как важнейший фундаментальный концепт перехода технологического развития на новый уровень. При этом метод исследования сосредоточен на изучении реакции отрасли как целого на изменяющиеся условия, без подробного описания механизма работы и внутреннего устройства той или иной технологии, так как в рамках поставленной задачи это не является первостепенным объектом изучения.

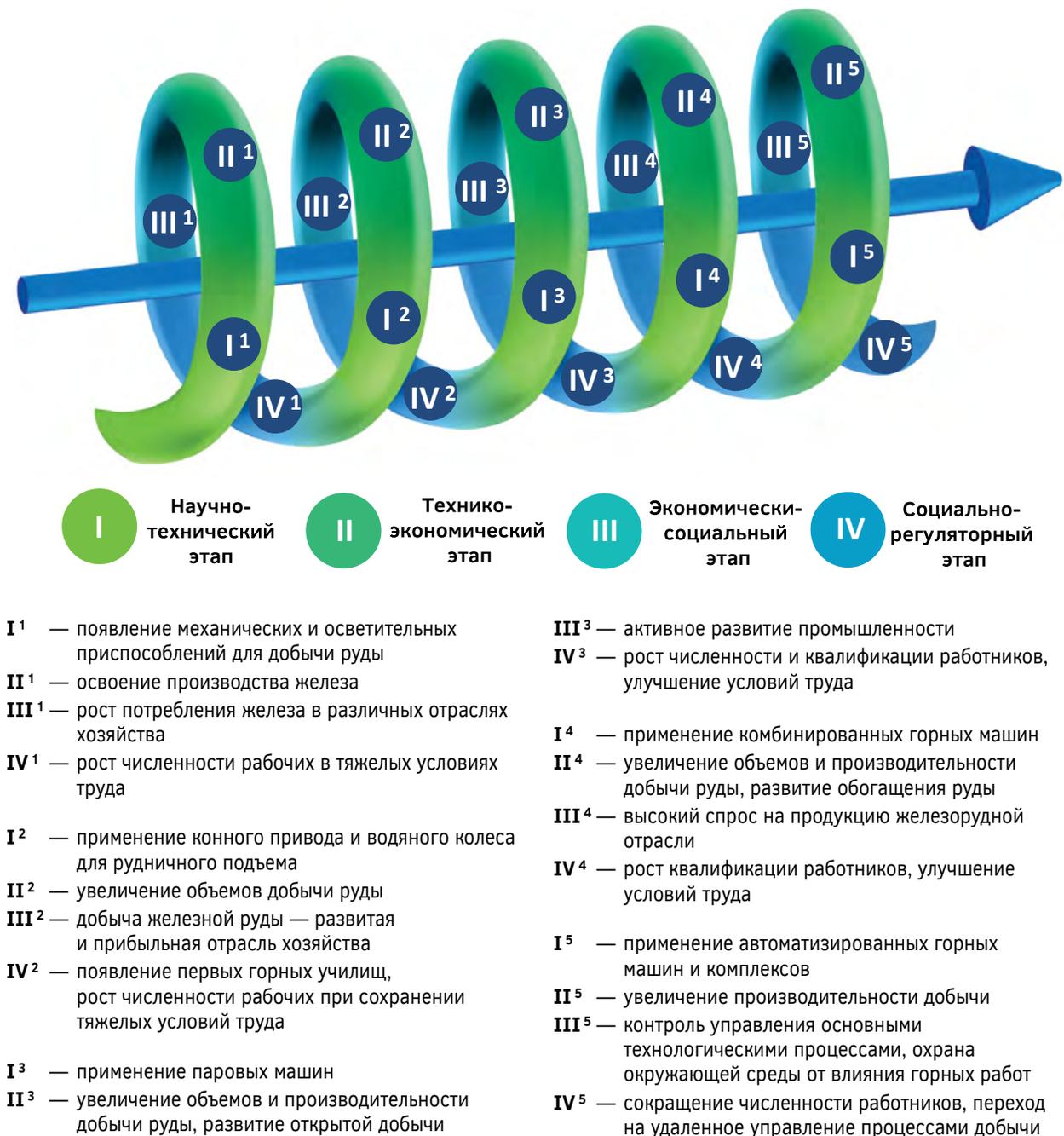


Рис. 3.3. Эволюция технологий добычи железной руды

ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ

Открытая добыча железных руд

На рис. 3.4 представлена общая схема технологического процесса при добыче железной руды открытым способом.

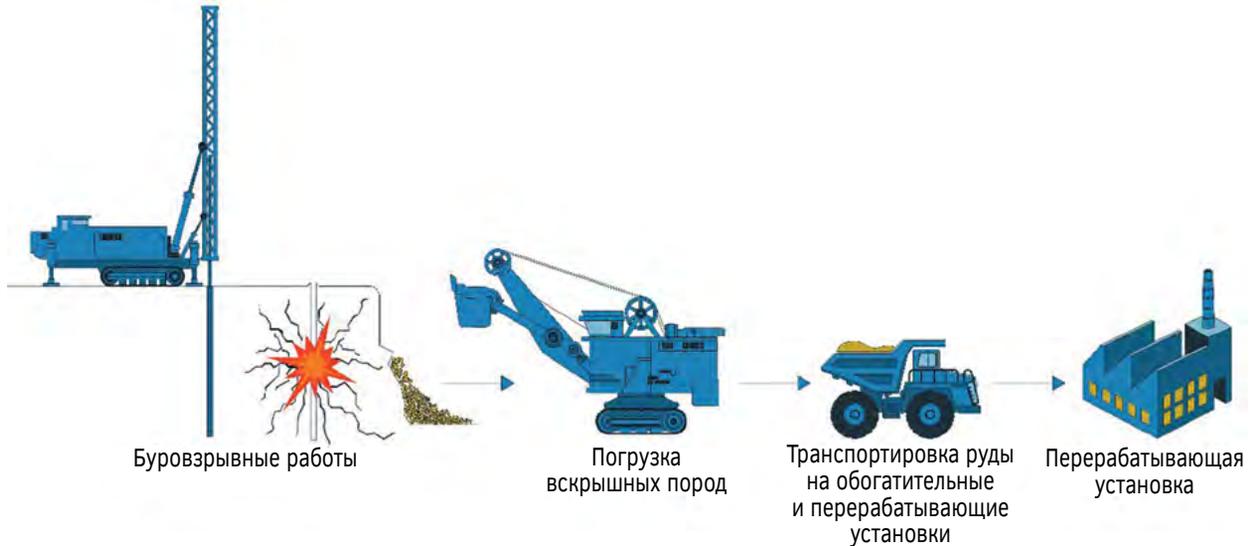


Рис. 3.4. Схема технологического процесса добычи железной руды открытым способом

Основными процессами открытых горных работ являются: снятие плодородного слоя почвы, производство вскрышных работ, буровзрывные работы, добыча руды, транспортировка, первичное дробление, складирование отвальных пород.

Снятие и складирование плодородного слоя почвы

В период эксплуатации месторождения при производстве вскрышных работ плодородный слой почвы срезается бульдозером параллельно или поперечно вскрышному уступу и сбрасывается на рабочую площадку, затем грузится основным технологическим оборудованием и вывозится транспортными средствами во временный отвал или на рекультивируемую площадь. При разработке вскрышного уступа драглайном последний снимает плодородный слой почвы и складировывает в штабель вдоль железнодорожного пути с последующей погрузкой в технологический транспорт.

Вскрышные работы

Породы вскрыши подразделяются на рыхлую и скальную вскрышу. К рыхлым породам относятся легкоэкскавируемые породы, выемка которых может производиться без предварительного рыхления буровзрывным методом. Для разработки мягких вскрышных пород в умеренных климатических условиях при высокой производительности карьера применяют многоковшовые роторные, цепные экскаваторы и драглайны с погрузкой на конвейерный, железнодорожный или автомобильный транспорт.

Наряду с роторными экскаваторами для разработки пород рыхлой вскрыши применяется гидромеханический способ. Гидромеханическим способом называют разработку грунта, его транспортировку и укладку при помощи воды. Мощный напор воды, размывающий рыхлые породы, создается гидромониторной установкой, в которую входит гидромонитор (стальной ствол с насадками, закрепленный на шарнирном соединении), подключенный

к магистральным трубопроводам, подающим воду из насосной станции. Шарнирное соединение дает возможность поворачивать стальной ствол в вертикальных и горизонтальных плоскостях под большими углами, выбирая нужное направление забоя. Насадки способствуют формированию струи с большой кинетической энергией. Струя смешивается с породой вскрыши, и получается гидросмесь — пульпа, которая самотеком стекает в приемные зумпфы. Далее из зумпфов при помощи грунтовых насосов пульпа по трубопроводам (пульпопроводам) транспортируется к местам размещения. Для повышения производительности гидромониторных установок применяется предварительное рыхление горных пород буровзрывным или механическим методом. Укладка пород вскрыши, разрабатываемых гидромониторами, происходит в специальные отвалы — гидроотвалы или при отсутствии таковых в хвостохранилища обогатительных фабрик. Гидроотвалы обычно располагаются в естественных понижениях рельефа (балках), ограниченных намывными дамбами, при отсутствии балок дамбы располагают со всех сторон. Укладка грунта происходит за счет снижения скорости его перемещения и оседания твердых частиц. Для отвода воды из гидроотвалов устраивают специальные дренажные колодцы, с которых вода по трубам отводится за пределы участка или используется в оборотном цикле, т. е. возвращается обратно по напорным водоводам к гидромониторам.

Буровзрывные работы

Буровзрывные работы представляют собой комплекс работ, связанных с подготовкой скального массива пород к экскавации. Ввиду крепости скальных пород их экскавация без предварительного буровзрывного или механического рыхления не может быть произведена: современным канатным, реечным или гидравлическим экскаваторам не хватает усилия на ковше для разрушения скального массива пород. Поэтому для подготовки к экскавации плотных, рыхлых, смерзшихся или скальных горных пород при выемке применяется предварительное рыхление или механическим способом (фрезы, рыхлители), или буровзрывным способом.

Бурение скважин производится преимущественно станками шарошечного бурения (СБШ), которые получили наибольшее распространение на открытых горных работах при добыче железной руды. Шарошечное бурение — способ бурения скважин с использованием шарошечного долота. Станки шарошечного бурения по принципу действия относятся к вращательным, разрушение породы в забое скважины происходит в результате скалывания породы в местах контакта поверхностного слоя с зубьями головки рабочего органа станка — шарошки. Шарошка привинчивается на буровой став трубчатых штанг. Конструктивно шарошки выполняются трех видов: с зубчатыми венцами, штыревые из твердого сплава и комбинированные. Первые предназначены для бурения средних по крепости пород, вторые — крепких, третьи — разнопрочных. Сами штыри в зависимости от крепости и вязкости пород имеют рабочую поверхность в виде клина или полусферы. Очистка скважины от буровой мелочи и охлаждение шарошек производятся продувкой сжатым воздухом, подаваемым к шарошке по полостям буровых штанг. Продукты бурения улавливаются специальными устройствами, установленными на станке. Станки могут бурить вертикальные и наклонные скважины диаметром от 150 до 320 мм. Давление на забой зависит от веса и конструктивных особенностей станка. Оно передается от станка через буровой став. Диаметр взрывных скважин зависит от многих факторов: категории буримости породы, расстояния между скважинами, наличия трещин в массиве горных пород, характеристик взрывчатого вещества, объема заполнения скважины взрывчатым веществом и др. Горнорудные предприятия определяют для себя оптимальный диаметр бурения, исходя из опыта проведения буровзрывных работ и научно-исследовательских работ. Зачастую на предприятии имеются станки с разным диаметром бурения, применяемые в зависимости от условий бурения и типов горных пород. Бурение скважин происходит через определенное расстояние, называемое сеткой скважин бурения.

При бурении скважин с высокой обводненностью (более 80%) применяется бентоглина для затирки устья и колонок скважин. Для предотвращения обрушения верхней части устья скважины применяются обсадные трубы: гофрированные пластиковые и трубы из плотного картона. Диаметр труб — от 140 до 311 мм.

Сущность метода скважинных рядов заключается в размещении взрывчатого вещества в наклонных или вертикальных скважинах с забойкой (заполнением) верхней части инертными материалами из песка, буровой мелочи или забоечного материала специального состава. Скважины располагаются в один или несколько рядов параллельно верхней бровке уступа, друг от друга на расчетном расстоянии по прямоугольной сетке или в шахматном порядке. Расстояние от первого ряда скважин до верхней бровки уступа должно обеспечивать безопасность размещения бурового станка на уступе и рабочих по заряданию скважин. Расстояние между скважинами выбирается таким образом, чтобы разрушения в массиве от каждой скважины перекрывали друг друга. Зарядание скважин, помещение внутрь скважины взрывчатого вещества осуществляются специализированными смесительно-зарядными машинами, доставляющими компоненты взрывчатых веществ из цеха по их изготовлению непосредственно на подготовленный для зарядания блок. Патрон-боевик, который служит для инициации взрывчатого вещества в каждой скважине, располагается внутри скважины обычно в самом низу. Это обеспечивает совпадение направления детонации заряда взрывчатого вещества и направления разрушения массива а также лучшую проработку подошвы. Заряд в скважине может быть сплошным и рассредоточенным по высоте воздушным промежутком или инертным материалом. Рассредоточение заряда позволяет увеличить эффективность использования взрывчатого вещества для дробления за счет более равномерного распределения взрывчатого вещества (ВВ) в массиве. Забойка скважин, т. е. заполнение пространства между ВВ, производится забоечными машинами или вручную. В качестве забоечного материала применяется песок, отсев, буровой шлам или вода (гидрозабойка). Доставка ВВ со склада или завода в карьер обеспечивается специальным и специализированным автотранспортом.

Добыча руды

Добычные работы представляют собой комплекс процессов по извлечению руды из массива горных пород. Добыча руды в железорудных карьерах осуществляется экскаваторным способом.

Процесс экскавации руды из массива заключается в срезании стружки режущей кромкой ковша, повороте экскаватора к месту разгрузки, разгрузке ковша и возвращении рабочего органа в забой. Выемка взорванной горной массы крепких пород осуществляется заглублением ковша в развал. По средствам перемещения рукояти с ковшом современные экскаваторы разделяются на канатные и гидравлические. Черпание у канатного экскаватора происходит благодаря усилию напорного механизма, расположенного на стреле, и его подъемных канатов от подъемных лебедок. Траектория черпания при этом сохраняется постоянной. Начинается она в нижней части забоя. У гидравлического экскаватора траектория черпания может быть разнообразной благодаря особому соединению рукояти со стрелой и дополнительному механизму поворота ковша на конце рукояти. Разгрузка у гидравлического экскаватора осуществляется опрокидыванием или раскрытием ковша. У канатного экскаватора разгрузка осуществляется открыванием днища ковша над местом разгрузки. Разгрузка руды осуществляется в автосамосвалы или железнодорожные думпкары.

Для канатных механических лопат радиус и высота черпания и разгрузки изменяются с изменением угла наклона стрелы, которая устанавливается под углом 45°. Габариты определяются по максимально выступающим частям экскаватора. Рабочие параметры экскаватора обуславливают параметры забоя и технологическую схему его работы. При установлении ширины забоя механической лопаты определяющим является радиус

черпания на уровне стояния. Максимальная производительность экскаватора достигается при минимуме передвижек в забое и возможно меньшем среднем угле поворота экскаватора от места черпания к пункту разгрузки. При погрузке руды в транспортные средства на уровне стояния экскаватора ширина тупиковой заходки определяется с учетом размещения транспортных коммуникаций и схемы подачи транспортных средств под погрузку. Высота забоя ограничивается высотой черпания экскаватора. Минимальная высота забоя механической лопаты принимается из условия наполнения ковша за одно черпание. Угол откоса поверхности забоя зависит от свойств разрабатываемого массива. При разработке забоя с погрузкой горной массы в средства железнодорожного транспорта ось железнодорожного пути располагают на расстоянии 0,8 максимального радиуса черпания от оси экскаватора. При погрузке на автомобильный транспорт автосамосвалы могут располагаться сбоку или позади экскаватора в зоне разгрузки ковша с минимальным углом разворота от места черпания. По условию безопасности ковш не должен перемещаться над кабиной водителя. При погрузке на конвейерный транспорт горная масса загружается экскаватором в бункер-питатель, который располагается с боку экскаватора или внутри заходки позади экскаватора.

Техническая производительность механических лопат зависит от вместимости ковша, длительности цикла и свойств разрабатываемых горных пород, которые влияют на длительность операции черпания и наполнения ковша. Рабочий цикл экскаватора складывается из следующих операций: черпание, выведение ковша из забоя, поворот его к месту разгрузки, подъем или опускание ковша на уровень разгрузки, возвращение ковша в забой и установка его для черпания. Операции выведения ковша из забоя и установки его на уровень разгрузки выполняются во время поворота его к месту разгрузки. Во время поворота экскаватора в забой выполняется операция опускания ковша к месту начала черпания.

Подземная добыча железных руд

Подземная разработка месторождений железных руд (как и прочих полезных ископаемых) осуществляется с использованием подземных горных выработок под толщей перекрывающих пород.

Схема технологического процесса добычи железной руды подземным способом с использованием в забое самотечно-напорного гидротранспорта приведена на рис. 3.5.

Подземная разработка месторождений состоит из трех стадий: вскрытие, подготовка и очистная выемка. В начале разработки месторождения эти стадии выполняются во времени последовательно, а затем совмещаются.

Планомерная и эффективная разработка месторождения возможна при условии строгой увязки во времени и пространстве вскрытия, подготовки и очистной выемки и при обеспеченности рудника достаточными запасами вскрытого, подготовленного и готового к выемке полезного ископаемого.

Вскрытие заключается в проведении горных выработок, открывающих доступ с поверхности к рудному телу и обеспечивающих возможность проведения подготовительных выработок.

Выработки вскрытия — шахтные стволы, околоствольные выработки, квершлагги, штольни, капитальные рудоспуски и др.

Вскрытие месторождений осуществляют главными и вспомогательными выработками. Главные вскрывающие выработки (стволы, штольни) служат для транспортирования железной руды (сырой) и пустой породы на поверхность, вентиляции, перемещения людей, доставки материалов и оборудования. Вспомогательные выработки служат для вентиляции, доставки оборудования, а также в качестве дополнительного выхода на поверхность и других целей. Взаимное расположение главных и вспомогательных стволов определяется принятой схемой проветривания.

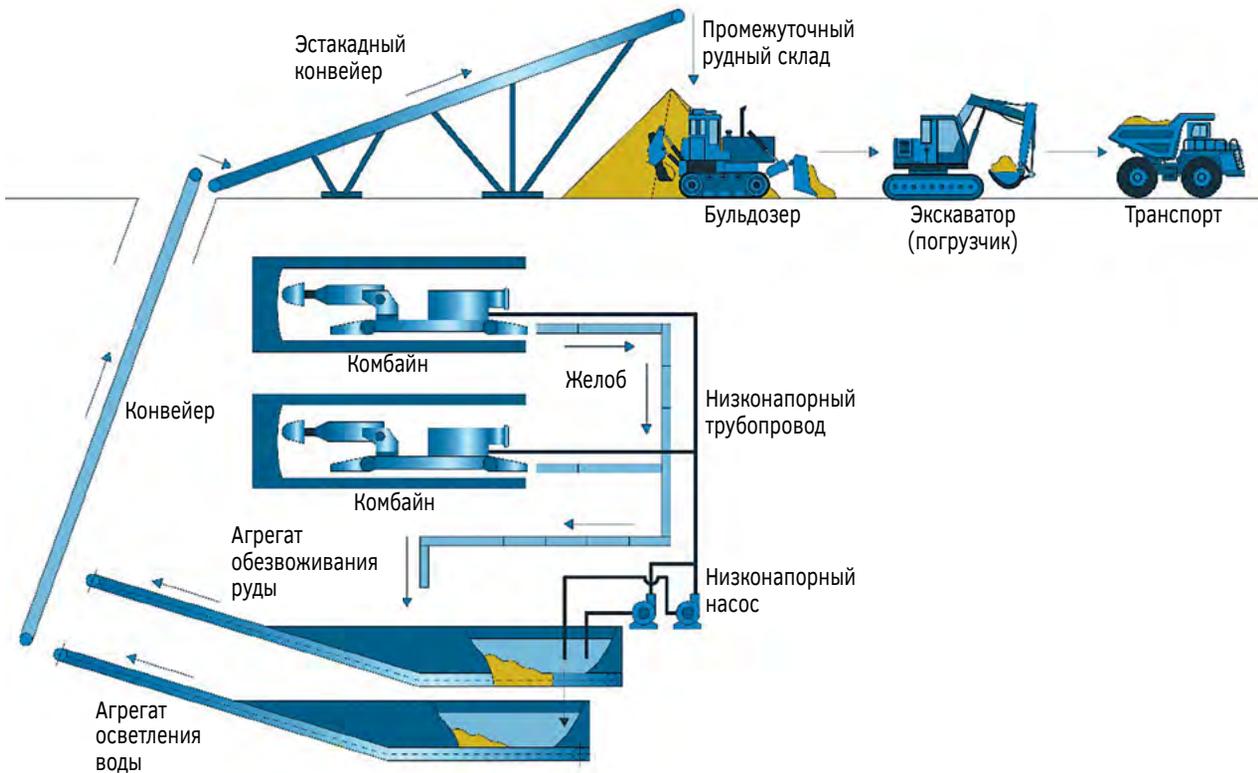


Рис. 3.5. Схема технологического процесса добычи железной руды подземным способом с использованием в забое самотечно-напорного гидротранспорта

Главные вскрывающие выработки проходят: по месторождению; по пустым породам со стороны лежачего либо висячего бока или с флангов; по пустым породам и руде, пересекая рудное тело.

Ввиду ответственного назначения выработок вскрытия и длительного срока их службы большое значение придается обоснованию и выбору их формы, размеров, сечений и способов проведения, крепления и расходов по ремонту крепи за все время существования. Размеры выработки принимают достаточными для нормальной работы транспорта, безопасными и удобными для передвижения людей, доставки материалов и оборудования, а также для обеспечения прохождения необходимого количества воздуха.

В зависимости от места расположения главных вскрывающих выработок способы вскрытия месторождения разделяют на простые и комбинированные. Существует достаточное разнообразие простых и комбинированных способов вскрытия.

К простым способам относятся вскрытия: вертикальным шахтным стволом по рудному телу, по породам лежачего бока, по породам висячего бока; наклонным шахтным стволом по породам лежачего бока и на флангах месторождения; вскрытие штольней по рудному телу, по породам лежачего бока, по породам висячего бока.

Комбинированные способы сочетают два или более способа вскрытия, например: вертикальный шахтный ствол с поверхности с переходом в вертикальный слепой ствол; вертикальный шахтный ствол с поверхности с переходом в наклонный слепой ствол; штольня с переходом в вертикальный слепой ствол; штольня с переходом в слепой наклонный ствол.

Подготовка (подготовительные работы) — это проведение горных выработок-штреков, восстающих, ортов и др., которыми вскрытая часть месторождения разделяется на обособленные выемочные участки: этажи, блоки, панели. Выемочный участок, в свою очередь, делится подготовительными и нарезными выработками на отдельные части: подэтажи, слои, прирезки, камеры, междуэтажные, междукамерные, междупанельные целики и др.

Способы подготовки основных горизонтов определяются технико-экономическим сравнением возможных вариантов, учитывающих геологические, технические, технологические и экономические факторы и зависят от характера рудного тела — его мощности и угла падения, от физико-механических свойств руды и вмещающих пород, принятого порядка очистной выемки в этаже, от способа транспортирования полезного ископаемого.

Назначение подготовительных выработок заключается в следующем:

- оконтуривание (выделение) этажа, шахтного поля, блоков или панелей;
- создание связи блока (панели) с общерудничной транспортной сетью;
- обеспечение эффективного проветривания рабочих мест;
- обеспечение свободного доступа в забои и аварийного выхода из них, снабжение забоев оборудованием, материалами, энергией, высокопроизводительная выдача из них добытой руды.

Принятый способ подготовки, расположение и размеры подготовительных выработок должны обеспечивать: безопасное производство очистных работ; эффективное проветривание очистных забоев; своевременную подготовку этажей и блоков для сохранения постоянного резерва подготовленных и готовых к выемке запасов руды с определенным средним содержанием полезных компонентов; удобные и безопасные условия передвижения людей, доставку материалов и оборудования по выработкам; минимальные потери руды в целиках, предохраняющих подготовительные выработки, удобные и производительные способы доставки руды, погрузки и откатки; минимальные расходы на поддержание выработок и ремонт крепи.

В рамках подготовки создаются коммуникации и магистрали для вентиляции, канализации электроэнергии, передвижения людей и транспортирования грузов.

При значительном притоке воды проведение подготовительных выработок должно обеспечивать своевременный дренаж месторождения.

Подготовленные запасы руды — запасы выемочных участков, в которых полностью пройдены подготовительные выработки, предусмотренные принятой системой разработки.

Разделение рудничного поля на этажи производят выработками основного горизонта — откаточными штреками и ортами. Восстающими и наклонными выработками этажи разделяют на выемочные блоки, в некоторых случаях этажи делят по высоте на подэтажи. Высота этажа составляет 50–100 м (редко более) в зависимости от горно-геологических условий и технологии добычи.

Для передвижения механизмов на участках очистной выемки используют систему горизонтальных выработок откаточного и вентиляционного горизонтов, восстающих и рудоспусков, при подготовке наклонными съездами используют съезды спиральной или иной формы и рудоспуски, сбитые с подэтажами.

При большой мощности рудных тел в породах лежачего бока проходят полевые восстающие, соединяющие полевые этажные штреки. Помимо этого, проходят вспомогательные восстающие у контакта висячего бока или восстающие, пересекающие рудное тело.

Отрезные, рудоспускные, вентиляционно-ходовые восстающие между подэтажами и дучки проходят буровзрывным способом секционного взрывания скважин, бурением или шпуровым расширением скважин большого диаметра. Наибольшее распространение способ проходки восстающих секционным взрыванием получил при оформлении отрезных восстающих или щелей при этажной и подэтажной отбойке руд.

Проходка восстающих выработок — один из трудоемких и опасных процессов.

Для механизации процессов проходки выработок с углом наклона 60–90° применяют комплексы КПВ.

Бурение с полков осуществляется перфораторами. Однако способ не исключает главного недостатка — пребывания проходчиков в опасных условиях, и в последнее время применяется все реже.

Способ проходки бурением и расширением вертикальных и наклонных скважин с использованием буровых станков — безлюдный и один из самых перспективных. Скорость проходки восстающих увеличивается по сравнению с буровзрывными способами в разы. Станки этого типа предназначены для проведения вертикальных и наклонных выработок диаметром до 3 м до 100 м в длину и под углом до 70° в породах с коэффициентом крепости до 12, по Протодьяконову, однако применяется и в более крепких породах. Применяют также станки для проходки восстающих снизу вверх сплошным забоем или в две стадии с первоначальным бурением опережающей скважины.

Горные выработки, проводимые в уже подготовленных участках и необходимые для производства выемки руды из этих участков, принято называть нарезными выработками, а выполняемые при их проведении работы — нарезными работами.

Нарезные выработки проходят в пределах блоков, панелей непосредственно для очистной выемки:

- подэтажные горизонтальные выработки разделяют блок на отдельные выемочные подэтажи;
- выработки горизонта скреперования — штреки или орты служат для доставки отбитой руды до выработок основного горизонта, а также для вторичного ее дробления;
- выработки горизонта грохочения — камеры, штреки, орты служат для вторичного дробления руды и перепуска руды на основной горизонт;
- выработки горизонта подсечки служат для подрезки массива руды в днище блока;
- отрезные восстающие служат для отрезки массива руды в заданном месте блока;
- щели, ходки, сбойки и ряд других выработок обеспечивают оптимальное развитие работ.

Для нарезки днища блоков используют самоходные буровые установки и погрузочно-доставочные машины или перфораторы на пневмоподдержке и скреперные установки различных модификаций.

Готовые к выемке — запасы руды подготовленных выемочных участков, в которых полностью пройдены нарезные выработки, необходимые для производства очистной выемки.

Создание и постоянное сохранение резерва вскрытых, подготовленных и готовых к выемке запасов необходимо для того, чтобы:

- планомерно и своевременно по мере отработки одних участков месторождения развивать добычу руды на других участках в необходимом количестве;
- иметь запас времени для эксплуатационной разведки и дренажа вводимых в эксплуатацию частей месторождения;
- поддерживать равномерное содержание полезных компонентов в руде, направляемой на переработку, путем планомерного ввода в очистную выемку участков месторождения с различным составом руды;
- иметь резервные участки на случай временного прекращения работ по вскрытию и подготовке или необходимости увеличения добычи руды сверхустановленного плана.

Очистная выемка — технологический процесс извлечения руды из выемочного участка и поддержания образующихся при этом очистных выработок и очистного пространства.

Очистное (выработанное) пространство может в процессе очистной выемки оставаться открытым, т. е. свободным, заполняться отбитой рудой, закладкой или обрушенными породами либо поддерживаться крепью.

Определенный порядок подготовки и очистной выемки во времени и пространстве принято называть системой разработки, во всем многообразии систем каждой системе присущи: конструктивные характеристики; порядок очистной выемки; технология очистной выемки. Очистная выемка при любой системе разработки включает три основные операции: отбойку руды — отделение ее от массива; доставку руды — перемещение отбитой руды от забоя до откаточного горизонта; составной частью этой операции являются выпуск и погрузка руды; поддержание выработанного пространства.

Из технологических процессов очистной выемки наибольшее влияние на расположение выработок откаточного горизонта оказывает доставка руды, включая ее погрузку. Нередко изменение того или иного элемента технологического процесса вызывает изменение схемы расположения откаточных штреков и ортов. Например, переход от скреперной доставки к вибровыпуску или самоходному оборудованию существенно меняет как схему, так и параметры выработок основного горизонта.

При разработке мощных месторождений, сложенных слабыми или трещиноватыми минералами, способными при обнажении на достаточной площади под действием гравитации и давления налегающей толщи обрушаться, используют феномен самообрушения.

Буровзрывной способ является универсальным для отбойки железных руд средней и высокой крепости, отбойку ведут с помощью зарядов ВВ в шпурах, взрывных скважинах и минных выработках. Взрывной способ разрушения основан на применении взрывчатых веществ, при быстротечном разложении которых освобождающаяся энергия взрыва отделяет от массива и осуществляет дробление горной массы.

Для бурения взрывных скважин и шпуров используют разнообразные буровые перфораторы, станки, каретки. Применяются буровые станки с пневматическим или гидравлическим приводом, с электродвигателем, двигателем внутреннего сгорания, дизель-электрическим приводом, самоходные, передвижные на специальных тележках. Бурильные машины с пневматическими двигателями необходимо обеспечивать сжатым воздухом, подаваемым от компрессора по воздуховодам, бурильные машины с электродвигателями снабжаются электроэнергией по кабелям, бурильные машины с двигателями внутреннего сгорания, как правило, потребляют дизельное топливо.

Расположение скважины может быть параллельным, параллельно-сближенным, веерным. Для размещения зарядов ВВ до недавнего времени самыми распространенными были скважины диаметром 105–110 мм, которые бурят отечественными станками с погружными пневмоударниками. В последнее время для подготовки массива к обрушению значительную долю буровых работ производят самоходным импортным оборудованием с диаметром скважин 89–102 мм.

По условиям технологического процесса отбитая руда должна иметь куски определенной крупности. Размеры максимально допустимого куска во взорванной горной массе определяются параметрами транспортных средств, дробилок и других приемных устройств, а также условиями работы оборудования.

Максимально допустимый размер кусков обычно принимают от 300–400 мм до 800–1000 мм, при отбойке руды взрывным способом образуется некоторое количество некондиционных кусков — негабаритов. Для дробления негабарита применяют взрывчатые вещества или механические устройства (дробилки, бутобои).

Для улучшения дробления руды и снижения сейсмического эффекта необходимо использовать дифференцированное распределение ВВ в рудном массиве (геометрию расположения вееров и пучков скважин) и короткозамедленное взрывание зарядов, например, с интервалами: 25, 50, 75, 100 и 150 мс.

При зарядании взрывчатое вещество засыпается в загрузочную емкость машины, затем поступает в питатель (барабанный, камерный или эжекторный), далее транспортируется сжатым воздухом (от шахтной пневмосети) по гибкому доставочно-зарядному шлангу в скважины или шпуры.

Механическая отбойка применяется в основном при выемке руд и пород низкой крепости, используются самоходные комбайны с шарошечными рабочими органами.

Механизированная доставка производится скреперами, погрузочно-доставочными машинами, конвейерами. Иногда доставку осуществляют силой взрыва.

Выпуск руды из очистного пространства через выработки днищ блоков, оборудованных вибродоставочными установками, производится непосредственно в откаточные сосуды. Выпуск на почву выработок обычно сопровождается вторичным дроблением руды, которое

зачастую осуществляется вблизи забоя в специальных выработках на горизонте доставки (грохочения). Далее производят перепуск руды через рудоспуски на откаточный горизонт и загрузку в подвижной состав через люки, вибропитатели и другие устройства.

Традиционно на железорудных месторождениях используют скреперную доставку и вибровыпуск, однако в настоящее время широко применяются самоходные погрузочные машины. Мощные подземные ковшовые погрузчики высокоманевренны. Они сконструированы и сделаны для тяжелых условий эксплуатации в ограниченном пространстве. По большей части они оборудованы дизельными двигателями. Надо признать, что погрузочно-доставочные машины с электрическим приводом обеспечивают лучшие условия труда за счет отсутствия выхлопных газов, меньшего уровня вибраций и шума.

На мощных железорудных месторождениях широко применяются системы разработки с обрушением руды и вмещающих пород, которые характеризуются обрушением подсеченного снизу или сбоку массива руды в подэтаже или этаже. Выпуск основной массы руды производится под обрушенными, опускающимися в процессе выпуска пустыми породами, которые заполняют выработанное пространство. Наиболее широкое распространение при разработке железных руд получило этажное и подэтажное обрушение с отбойкой руды глыбками скважинами.

Принудительное этажное и подэтажное обрушение без компенсационных камер предполагает отбойку секциями на массив ранее обрушенной руды или пустой породы. Единая технология очистной выемки для всех участков блока этажа характерна для этой системы. Поэтому ее относят к системам с одностадийной выемкой в отличие от этажно-камерных систем, систем этажного обрушения на компенсационные камеры и ряда других, в которых отработка блока осуществляется в две или даже три стадии (выемка камер, отработка потолочины и междукамерных целиков, выемка днища). Следует отметить, что в недостаточно устойчивых рудах отбойка в зажатой среде может вызвать нарушение массива руды и пройденных в нем выработок. Поэтому применение подэтажного обрушения без компенсационного пространства требует в каждом отдельном случае проведения опытных работ.

Вариант с обрушением руды на почву подэтажных (доставочных) выработок, называемый часто шведским вариантом подэтажного обрушения или вариантом с торцовым выпуском, является одним из наиболее простых и производительных.

Горные выработки и пустоты, образовавшиеся после выемки полезного ископаемого, заполняются со временем или сразу обрушающимися породами, в результате чего массив пород над месторождением деформируется и оседает. Сдвигание пород обычно вызывает плавное оседание земной поверхности, без разрыва ее сплошности, или резкое, со значительными смещениями и провалами.

Закладка пустот — заполнение их закладочным материалом: пустой породой, хвостами обогатительных фабрик, твердеющими смесями и т. п.

Способ используется в подземной разработке железных руд при необходимости сохранять земную поверхность от разрушения или минимизировать влияние горных работ на важные объекты. Это особенно важно из-за наличия водоносных горизонтов, водоемов или крупных сооружений на поверхности и пр.

Закладочным материалом чаще всего являются попутно или специально добываемые породы, хвосты обогатительных фабрик. По признаку заполнения выработанного пространства закладка может быть полной или частичной. Чаще всего используют:

- твердеющую гидравлическую закладку — закладочный материал включает вяжущие вещества; в результате твердения закладки образуется монолитный массив значительной устойчивости и прочности;
- сухую закладку — закладочный материал не содержит воды сверхъестественной влажности.

В заключительной стадии выемки запасов очистные выработки погашают или приводят в такое состояние, в котором они будут находиться в течение неопределенно долгого времени.

Подземный транспорт — комплекс сооружений и устройств, предназначенный для приема и перемещения различных грузов и людей. В задачи шахтного транспорта входит формирование и реализация встречных грузопотоков. Основная цель — транспортирование руды и породы от пунктов выгрузки из очистных блоков, проходческих забоев до перегрузочных комплексов, околоствольных дворов и рудничного подъема.

Кроме того, транспорт осуществляет функцию своевременного и бесперебойного снабжения добычных участков материалами, инструментом, оборудованием и при необходимости перевозку людей к месту работы и обратно.

На рудниках, добывающих железные руды, используют:

- рельсовый транспорт (контактные электровозы, рудничные вагонетки);
- самоходное оборудование на пневмошинном ходу;
- конвейерную доставку.

Безрельсовое транспортирование с использованием самоходного оборудования применяется редко. Основной вид транспорта — автосамосвалы высокой грузоподъемности.

Ленточные конвейеры применяют только для транспортирования руды, прошедшей стадию дробления в подземных комплексах дробления.

Подъем и подземный транспорт — это звенья одной транспортной системы. По типу оборудования рудничный подъем разделяют на клетевой, скиповой, конвейерный, автомобильный, а по назначению — на главный (для выдачи руды) и вспомогательный. Для вспомогательного подъема по вертикальным стволам используют то же оборудование, что и для главного. Его назначение заключается в выдаче на поверхность породы (вагонами в клетях или скипами), спуске-подъеме людей (в клетях), спуске в шахту материалов, инструмента (в клетях), спуске рабочего и подъеме неисправного оборудования (малогабаритное — в клетях, крупногабаритное — на подвеске под клетями, целиком или частями или на специальных грузовых платформах в неразобранном виде по отдельным стволам).

На железных рудниках при значительной глубине разработки используют скиповой подъем руды. Высокая производительность скипов объясняется их большей вместимостью (до 50 т), скоростью движения (до 20 м/с и более, тогда как клетки движутся со скоростью не более 8 м/с), а также полной автоматизацией погрузочно-разгрузочных операций и подъема-спуска скипов.

Конвейерный подъем эффективно применять на сравнительно неглубоких рудниках (до 400–600 м) большой производительности (свыше 4–5 млн т/год), а также с меньшей производительностью при доработке глубоких горизонтов для подъема руды на вышележащий комплекс загрузки скипов. Как правило, применяют мощные ленточные конвейеры. Для использования конвейерного подъема необходимо сравнительно мелкое дробление руды на куски размерами не более 0,1–0,15 м. Угол наклона ствола не должен превышать 16–18°.

Автомобильный подъем руды применяется в нашей стране в единичных случаях. Угол наклона автомобильных уклонов, съездов, стволов составляет 6–8°.

Шахтный водоотлив предназначен для откачки воды из горных выработок шахты. Главный рудничный водоотлив осуществляет откачку общешахтного притока воды посредством подъема воды по трубам на поверхность, участковый водоотлив — перекачку воды из отдельных участков шахты к водосборникам главного водоотлива (реже — непосредственно на поверхность земли). Схема водоотлива определяется проектом в зависимости от способа вскрытия, порядка разработки и гидрогеологических условий месторождения.

Большинство железорудных шахт имеют значительные глубины, на них применяется ступенчатый водоотлив, когда из нижних горизонтов вода перекачивается в промежуточные водосборники вышележащих горизонтов и затем на поверхность.

В систему шахтного водоотлива входят: водоотводные канавки, водосборники, насосные станции с водозаборными колодцами и водоотливными установками, с всасывающими и нагнетательными трубопроводами. В стволах оборудуются зумпфовые водоотливы, перекачивающие воду в шахтную водоотливную сеть.

Шахтные водосборники и насосные камеры располагают с учетом схем вскрытия и других горно-геологических и горнотехнических условий. Для главного водоотлива на шахтах применяются в основном центробежные многоступенчатые секционные насосы в горизонтальном исполнении, допускающие содержание механических примесей в воде (частицы до 0,1–0,2 мм) до 0,1–0,2%. Количество насосов строго регламентируется.

Для подачи воды на поверхность в стволе шахты прокладываются несколько ставов нагнетательных труб — рабочие и резервные.

Водоотливные установки оборудуются аппаратурой автоматизации, контроля и защиты. Аппаратура автоматизации обеспечивает автоматическую заливку, пуск и остановку насосов в зависимости от уровня воды в водосборнике, поочередную работу насосов, автоматическое включение резервных насосов при аварийном подъеме уровня воды в водосборнике и неисправности работающего насоса, дистанционный контроль и сигнализацию об уровне воды в водосборнике.

Рудничная вентиляция или проветривание шахт применяется для создания в подземных выработках нормальных атмосферных условий, исключающих вредное воздействие на человека ядовитых газов, высоких и низких температур. Основной принцип организации проветривания горных выработок шахты (рудника) — создание сквозной вентиляционной струи за счет общешахтной депрессии и пропуска этой струи через последовательно соединенные выработки. Используется нагнетательный, всасывающий или нагнетательно-всасывающий способ вентиляции и специальный порядок распределения и движения воздуха по выработкам. Воздух подают в шахту по одним выработкам, а отводят на поверхность по другим. Свежий воздух по выработкам распределяют в соответствии с потребностью при помощи вентиляционных устройств: автоматических вентиляционных дверей, шлюзов и перемычек.

Источником движения воздуха в горных выработках являются шахтные вентиляторы главного и местного проветривания. Используются центробежные вентиляторы типа ВЦ и осевые вентиляторы типа ВОД. Широко применяется частотное регулирование приводных электродвигателей. Главные вентиляторные установки (ГВУ) снабжаются системой дистанционного управления приводом вентилятора и контроля параметров работы с пульта главного диспетчера шахты. ГВУ оборудуют системой реверсирования вентиляционной струи. При работе вентиляторов на нагнетание в ГВУ дополнительно устраивается калориферная установка для подогрева воздуха в зимнее время. По типу теплоносителя калориферные установки могут быть с прямым нагревом воздуха с использованием природного газа, электрическими, паровыми или водяными.

При прохождении по подземным выработкам вентиляционной струи к рудничному воздуху примешиваются пыль, различные газы, появляющиеся вследствие производства взрывов, работы дизельных машин, гниения деревянной крепи и т. д. Основная мера борьбы с примесями вредных газов — разжижение их свежим воздухом до предельно допустимых концентраций, например: газообразных продуктов взрыва ВВ (в первую очередь СО — 0,0017%, NO₂ — 0,00026%); выхлопных газов, работающих в выработке машин с двигателями внутреннего сгорания (ДВС). Все машины с дизельными ДВС должны быть оборудованы двухступенчатой системой очистки выхлопных газов (каталитической и жидкостной).

Для эффективного выноса пыли из забоя скорость воздуха должна быть не менее расчетной, кроме того, для борьбы с запыленностью шахтного воздуха применяют специальный комплекс мер, среди которых наиболее распространено гидрообеспыливание.

Обращение с пустыми породами

В зависимости от условий залегания извлекают не только полезное ископаемое, но и пустые породы или некондиционную руду. Кроме того, создание и постоянное сохранение резерва вскрытых, подготовленных и готовых к выемке запасов требуют значительных объемов проходческих работ. Это существенные объемы горной массы при годовой добыче в несколько

миллионов тонн железной руды. Удельный расход выработок на 1000 т сырой руды: горноподготовительных выработок может достигать 2–6 м³, нарезных — 8–14 м³. Во время эксплуатации месторождения большую часть нарезных выработок проводят по рудному массиву (путная добыча); капитальные и горно-подготовительные выработки, как правило, проходят по вмещающим породам. Пустые породы из добычи и от проходки горных выработок необходимо транспортировать отдельным потоком, выдавать на поверхность и складировать в отвалы. Для этого используются рудничный транспорт и подъем, на поверхности используется автомобильная и бульдозерная техника. Технология отвалообразования и комплексная механизация аналогичны процессам отвалообразования пустых пород на открытых горных работах.

Руды, по своим кондициям не отвечающие в настоящее время требованиям переработки или потребителей, попутные полезные ископаемые, не используемые в данный момент, укладываются в отдельные отвалы.

Существует положительная практика применения пустой породы в качестве сухой закладки подземного выработанного пространства, зон сдвижения и воронок обрушения на земной поверхности.

Обогащение железных руд

Обогащение руд — совокупность методов разделения металлов и минералов друг от друга по разнице их физических и/или химических свойств.

В результате обогащения составные компоненты руды выделяются в следующие продукты: концентраты (один или несколько) и хвосты. Если из руды получают два и более концентратов различных полезных компонентов, обогащение называется комплексным.

Технология обогащения руды представляет собой ряд последовательных операций (процессов), в результате которых происходит отделение одного или нескольких полезных компонентов от примесей. Процессы обогащения по своему назначению делятся на подготовительные, основные (собственно, процессы разделения минералов) и вспомогательные.

Подготовительные процессы — дробление, измельчение, грохочение и классификация предназначены для получения продукта заданной крупности, требуемой для последующего процесса.

Дробление и измельчение — процессы уменьшения размеров кусков полезных ископаемых под воздействием внешних сил. При дроблении получают продукты крупнее 5–8 мм, при измельчении — менее 5 мм.

Для разделения руды, дробленого или измельченного материала на продукты различной крупности применяют грохочение и классификацию.

Грохочение — рассев руды на классы крупности на решетках или ситах с калиброванными отверстиями.

Классификация — разделение дробленой или измельченной руды по крупности, основанное на выносе мелких частиц движущимся водным или воздушным потоком.

К основным относятся процессы, собственно, обогащения-разделения минералов, в результате которых полезные компоненты выделяются в виде концентратов, а порода и примеси удаляются в виде хвостов. Процессы обогащения (разделения) основаны на различиях в физических или физико-химических свойствах разделяемых минералов: крупности, форме, плотности, магнитной восприимчивости, электропроводности, смачиваемости и др.

В гравитационных процессах используются различия в плотности, крупности и форме зерен.

Магнитный метод (магнитная сепарация) обогащения основан на различиях удельной магнитной восприимчивости и магнитной проницаемости минералов, слагающих руду.

Электрический метод (электрическая сепарация) обогащения использует различия в электропроводности и способности минералов приобретать под воздействием тех или иных внешних сил различные по величине и знаку электрические заряды.

Флотационный метод (флотация) обогащения основан на различиях в физико-химических свойствах поверхности минералов, обуславливающих их различную смачиваемость водой, характеризующихся свойствами гидрофильности или гидрофобности поверхности различных минералов, определяемых краевым углом смачивания.

Специальные методы обогащения основаны на различиях в оптических (фотометрическая сепарация), люминесцентных (люминесцентная сепарация), радиометрических (радиометрическая сепарация) и некоторых других свойствах минералов.

К вспомогательным относятся процессы обезвоживания, пылеулавливания, сушки. Сушка является одним из способов обезвоживания.

Подготовительные, основные и вспомогательные процессы в совокупности образуют технологическую линию, или технологический процесс обогащения.

Особое место на обогатительной фабрике занимают процессы производственного обслуживания, предназначенные для нормального функционирования технологических процессов. К числу процессов производственного обслуживания относятся внутрифабричный транспорт руды и продуктов обогащения (конвейеры, пульпопроводы), водоснабжение, электроснабжение, снабжение сжатым воздухом, контроль технологических параметров процесса, технологический контроль качества продуктов обогащения и т. д.

СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ

В зависимости от условий залегания рудных месторождений и мощности залежей разработка осуществляется открытым и подземным способами.

Открытая разработка применяется, если рудное месторождение залегает неглубоко. Подземный способ применяется в случае залегания руд на значительной глубине.

Преимущества открытого способа добычи:

- уровень комплексной механизации и автоматизации горных работ обеспечивает большую производительность труда и меньшие затраты на добычу полезного ископаемого;
- более безопасные и комфортные условия труда;
- более полное извлечение полезного ископаемого;
- меньшие удельные капитальные затраты на строительство.

Недостатки открытого способа:

- необходимость выемки значительно превышающих объем руды вскрышных пород, что составляет основную часть общих затрат;
- необходимость изъятия из пользования значительных площадей земли и изменение ландшафта;
- изменение гидрологической ситуации в районе добычных работ.

При подземном способе разработки объемы перемещаемых пустых пород по сравнению с открытым способом незначительны и требуют меньших площадей для их размещения. Обеспечивается сохранность земной поверхности.

К преимуществам добычи подземным способом относится меньшее негативное воздействие, оказываемое на окружающую природную среду, по сравнению с открытой добычей, главным образом, за счет меньшей площади нарушенных земель. Однако этот способ характеризуется более высокими удельными показателями расхода электроэнергии по сравнению с добычей открытым способом.

Добыча открытым способом отличается большим удельным расходом топлива (в основном, за счет моторного топлива) в сравнении подземным способом (рис. 3.6).

Сравнение негативного воздействия добычи железной руды открытым и подземным способами на окружающую среду проводилось на основании маркерных показателей, отобранных по критериям определения наилучших доступных технологий (НДТ) информационно-технического справочника по добыче и обогащению железных руд.

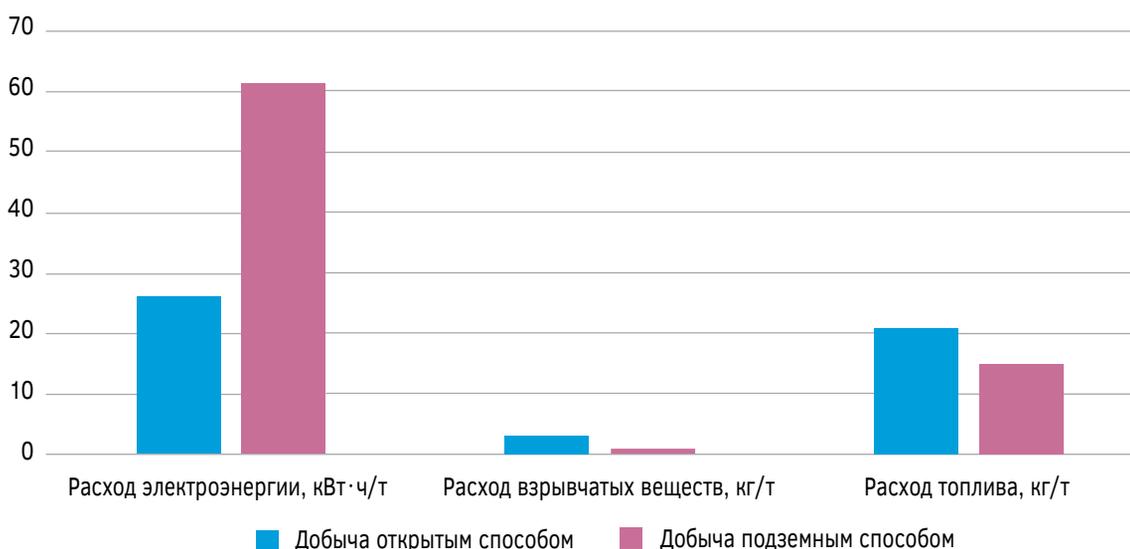


Рис. 3.6. Сравнение технологий

Для определения маркерных веществ из перечня выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при добыче железных руд приняты следующие критерии маркерных веществ:

- вещество оказывает негативное воздействие на окружающую среду;
- вещество характерно исключительно для рассматриваемого технологического процесса;
- вещество присутствует в эмиссиях в значительном количестве и на подавляющем большинстве рассматриваемых предприятий.

В табл. 3.6 представлено сравнение технологических показателей выбросов маркерных веществ по технологиям добычи. Эти данные показывают, что при добыче открытым способом выбросы пыли существенно выше, чем при добыче подземным способом.

Таблица 3.6. Сравнение выбросов маркерных веществ в атмосферу при добыче железной руды

Вид деятельности	Маркерное вещество	Технологический показатель НДТ, г/т
Производственный процесс добычи железных руд открытым способом	г пыли/т добываемой горной массы	≤ 35*
Производственный процесс добычи железных руд подземным способом	г пыли/т добываемой горной массы	≤ 16**

Примечания:

* Без учета взрывных работ, пыления отвалов пустых пород и некондиционных руд.

** Показатель распространяется только на один вентиляционный ствол (источник измерений).

РОЛЬ ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ ОТРАСЛИ В МИРЕ И В РОССИИ

Мировой рынок характеризуется высокой степенью консолидации. Четыре ведущие компании (Vale, BHP Billiton, Rio Tinto и FMG) контролируют более 70% мировой торговли железной рудой. Ведущими странами-производителями товарной железной руды являются Австралия, Бразилия, Китай, Индия и Россия, которые вместе производят более 75% железной руды. В последние годы в различных регионах наблюдалась разнонаправленная динамика объемов производства железной руды, которая была связана с низкими ценами на концентраты. Мировое производство железной руды представлено в табл. 3.7.

Таблица 3.7. Производство концентратов железной руды ведущими странами мира, млн т

Страна	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	Уд. вес по 2016 г., %
Австралия	404	449	496	581	641	759	809	41,1%
Бразилия	349	373	372	366	401	383	380	19,3%
Китай	310	340	355	377	317	246	161	8,2%
Индия	192	164	133	126	157	116	159	8,1%
Россия	89	94	97	98	105	95	95	4,8%
Прочие	367	397	410	456	489	403	363	18,5%
ВСЕГО:	1711	1817	1863	2004	2110	2002	1967	100%

Мировая динамика цен на железную руду в 2012–2016 гг. (62% Fe) представлена на рис. 3.7.



Рис. 3.7. Динамика цен на железную руду в 2012–2016 гг. (62% Fe), долл./т

Снижение цен на железную руду прежде всего связано с ситуацией в экономике Китая как крупнейшего в мире производителя стали, на долю которого приходится 2/3 мирового импорта железной руды. Два фактора — значительный дополнительный объем предложения железорудного сырья (ЖРС) из Австралии в связи с ростом добычи компаниями Rio Tinto, BHP Billiton и FMG и замедление темпов роста экономики Китая — оказывают наиболее существенное давление на цены.

Дополнительное давление на цены ЖРС оказало установленное в 2014 г. для китайских производителей стали ограничение на доступ к кредитным ресурсам, что привело к увеличению запасов руды в портах. Долгосрочные тренды развития рынка ЖРС формируются под влиянием различных факторов. С одной стороны, качество руды на мировом рынке постепенно снижается. Ухудшение качества входящего сырья приводит к увеличению себестоимости выпуска стали и повышению объема вредных выбросов металлургии. Вместе с тем

нарастающей тенденцией в мире является ужесточение экологической политики. В частности, Китай, по-прежнему являющийся локомотивом мирового спроса на ЖРС, по примеру развитых стран (США, страны Европы) взял курс на ужесточение экологических требований, предполагающих снижение вредного воздействия металлургических производств на окружающую среду, в том числе посредством улучшения качества потребляемого ЖРС.

Рост экологических требований к мировой черной металлургии и снижение качества железных руд создают предпосылки к росту маржинальности сырья с высоким содержанием Fe. Уточним терминологию.

Железорудное сырье — вид металлургического сырья, которое используется в черной металлургии для производства чугуна и металлизированного продукта (DRI и HBI), а также в незначительном количестве в выплавке стали. Железорудное сырье подразделяется на два вида: подготовленное (агломерированное) и неподготовленное (неагломерированное) сырье.

Подготовленное ЖРС — это сырье, готовое к использованию в доменных печах для производства чугуна.

Неподготовленное ЖРС является сырьем для производства агломерированного сырья. Неподготовленное ЖРС — это концентрат, доменная и аглоруда. Концентрат производится в основном в результате магнитной сепарации измельченной железной руды с низким содержанием железа. Извлечение железа в концентрат составляет в среднем около 80%, содержание железа в концентрате 60–65%.

Железорудное сырье для доменного процесса подвергается агломерации и окускованию. Агломерат получают из аглоруды и концентрата, а для производства окатышей применяются только концентраты.

К подготовленному железорудному сырью относят агломерат и железорудные окисленные окатыши.

Агломерат — окускованный рудный концентрат, полученный в процессе агломерации. Спекшаяся в куски мелкая (часто пылевидная) руда размерами 5–100 мм с незначительным содержанием мелочи.

Окатыши производятся из железорудного концентрата с добавлением связующих и флюсующих добавок в результате окомкования смеси (гранулы диаметром 5–18 мм) и последующего упрочняющего обжига.

Железо прямого восстановления является железорудным сырьем для сталеплавильных печей в электрометаллургии. Концепция загрузки электродуговых печей (ЭДП) продукцией DRINBI дает возможность использовать более высокую энергию плавки при увеличении производительности печи. Однако его можно также загружать в мартеновские и конвертерные печи (вместо металлолома). Доменный процесс в таком производстве полностью исключен. Поэтому сырье DRINBI позволяет снизить негативное влияние металлургического производства на окружающую среду, в том числе за счет уменьшения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

Динамика производства железорудного сырья в России представлена в табл. 3.8.

Анализ статистических данных показывает, что 2009 г. был кризисным для черной металлургии. Однако за последние семь лет наблюдается стабильный рост производства практически всех видов железорудного сырья. По итогам 2016 г. этот прирост обусловлен, в первую очередь, реализацией мероприятий реконструкции и модернизации действующего производства. Основные усилия производителей направлены на повышение качественных характеристик ЖРС и, прежде всего, на содержание железа.

С 2010 г. активизировалась реализация различных инвестиционных проектов. Рост и совершенствование производственных мощностей сталеплавильного производства предопределяет, что будет расти спрос на материал с высоким (>90%) содержанием железа, полученный по технологии, отличной от доменного передела, которую называют прямым восстановлением железа (ПВЖ), или металлизацией. Это, в первую очередь, связано с ужесточением экологических требований — как в России, так и за рубежом.

Таблица 3.8. Статистика производства железорудного сырья, тыс. т

	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.
Концентрат железорудный	91 956,9	95 272,0	103 607,3	104 010,0	102 156,5	102 018,5	101 926,8	103 525,8
Окатыши	33 455,0	37 378,4	38 419,7	38 999,7	39 410,9	39 684,5	40 972,3	42 823,7
Агломерат железорудный	52 916,6	56 984,4	57 802,1	58 783,0	58 762,4	59 271,7	60 392,0	59 350,0
Окатыши металлизированные	2 438,4	2 431,8	2 732,7	2 765,8	2 730,0	2 866,3	2 833,6	3 035,1
Горячебрикетированное железо (ГБЖ)	2 164,8	2 271,0	2 418,4	2 408,1	2 578,9	2 408,5	2 601,9	2 663,0
ИТОГО прямо-восстановленное железо (ПВЖ)	4 603,2	4 702,8	5 151,1	5 173,9	5 308,9	5 274,8	5 435,5	5 698,1

Важным условием развития производства ГБЖ в России является наличие высококачественного железорудного сырья и доступность больших объемов природного газа. Дефицит этих ресурсов препятствует росту производства ГБЖ во многих регионах мира.

Высокие потребительские качества ГБЖ способствуют продвижению этой продукции на мировом рынке. По оценкам Midrex, авторитетного источника статистики по рынкам металлизированного сырья, прирост мощностей по производству ГБЖ/ПВЖ в ближайшее десятилетие составит не менее 5 млн т в год, а объем производства к 2030 г. вырастет до 200 млн т.

Мировое производство горячебрикетированного железа представлено в табл. 3.9.

Таблица 3.9. Мировое производство ГБЖ, млн т

	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.
Мировое производство ГБЖ	51,82	55,41	55,55	58,85	59,16	57,39	59,8

ГБЖ — важный компонент при производстве высококачественных марок стали, способствующий снижению себестоимости продукции металлургического производства. ГБЖ является продукцией с высокой добавленной стоимостью, что обусловлено энергоэффективностью и экологичностью процесса производства ГБЖ, низким содержанием вредных примесей, стабильностью химического состава (по качеству превосходящего металлолом), а также высокой насыпной массой и отсутствием сезонности поставок.

В целом можно сделать вывод, что спрос на железную руду как в России, так и в мире будет расти. Это связано с мировым ростом населения, освоением новых территорий, с заменой изношенных основных фондов.

Наиболее быстрые темпы роста численности населения ожидаются в Африке. Из 2,4 млрд т прироста мирового населения к 2050 г. 1,3 млрд придется на Африку, 0,9 млрд — на Азию. Наиболее высокие темпы роста наблюдаются в странах, находящихся на стадиях, предшествующих бурному экономическому росту. Существенное влияние на изменение географии спроса окажут растущие страны, имеющие достаточно высокие доходы для осуществления модернизации: Индия, Иран, Нигерия. В ближайшие годы рост численности населения в этих регионах будет сопровождаться масштабной индустриализацией и интенсификацией потребления металлов, тем самым создавая новый рынок сбыта черных и цветных металлов. Модернизация экономики, происходящая в названных странах, будет оказывать существенное позитивное влияние на темпы роста глобальных рынков металлов.

Индия в меньших масштабах, чем Китай вполне может повторить рост спроса на продукцию металлургии по мере вхождения в активную фазу индустриализации и урбанизации. При этом доля крупнейших потребителей металлов (ЕС, США, Китай) будет уменьшаться на фоне роста спроса в новых регионах.

Нынешнее снижение мировых цен на железную руду не влияет на уровень добычи железорудных кварцитов в РФ. Это связано как с резким ростом курса иностранных валют по отношению к рублю в последние годы, так и с российским регулированием квот и тарифов на ввоз государством заменяющего сырья, т. е. импорт стали из Китая в ближайшие годы не предусматривается. В частности, в 2015 г. в США были введены квоты, когда тариф на импорт стали из Китая составил более 200%, что привело к резкому снижению поставок железной руды из Китая.

Но мировое снижение цен, пусть даже в посткризисный период, может отрицательно сказаться на внутреннем рынке РФ. В связи с этим уже сейчас рассматриваются государственные программы (оборонзаказ, дорожное строительство, жилищное строительство, машиностроение) по росту металлопотребления на внутреннем рынке. На основании данных Rusmet и РБК объем необходимых ресурсов для старта программ — от 1 трлн руб.

Основными потребителями продукции металлургической промышленности являются следующие отрасли: жилищное и инфраструктурное строительство, транспортное машиностроение, производство машин и оборудования, химическая промышленность, оборонно-промышленный комплекс, производство посуды, бытовой техники и медицинских изделий. Прогнозируемый среднегодовой темп прироста строительства до 2030 г. составляет 1,6%. Он будет обеспечен за счет выполнения планов по переселению граждан из аварийных и подлежащих сносу домов, реализации программы «Жилье для российской семьи», государственной программы «Обеспечение доступным и комфортным жильем и коммунальными услугами граждан Российской Федерации». Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 г. предусматривает развитие транспортных систем крупных городских агломераций, обеспечение транспортной доступности Крайнего Севера, Сибири, Дальнего Востока. В 2015 г. в новую редакцию схемы трубопроводного транспорта страны были внесены газопроводы «Турецкий поток», «Сила Сибири», «Алтай», «Краснодарский край — Крым», а также предусмотрена возможность реконструкции более 2 тыс. существующих объектов. Прогнозируемый среднегодовой темп прироста транспортного машиностроения до 2030 г. составляет 8%. Он базируется на реализации подпрограммы «Развитие транспортного и специального машиностроения» государственной программы «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности». Прогнозируемый среднегодовой темп прироста производства продукции авиастроительной отрасли до 2030 г. составляет 2,0%. Данный прогноз базируется на прогнозируемом обновлении российского авиационного парка в рамках реализации государственной программы «Развитие авиационной промышленности на 2013–2025 гг.». Прогнозируемый среднегодовой темп прироста производства продукции тяжелого машиностроения к 2030 г. составит 7,1%. Прогнозируемый среднегодовой темп прироста производства электрооборудования до 2030 г. составляет 4,7%. Данный прогноз базируется на прогнозируемом росте спроса со стороны промышленности, обновлении мощностей и реализации планов по строительству атомных электростанций на основе Энергетической стратегии России на период до 2030 г. и государственной программы Российской Федерации «Развитие атомного энергопромышленного комплекса».

Мероприятия по развитию спроса на продукцию отраслей металлургии

Немаловажным фактором являются разработка и реализация мероприятий по развитию спроса на продукцию металлургических отраслей, принимаемых на уровне Правительства Российской Федерации и реализуемых федеральными органами исполнительной власти совместно с представителями бизнес-сообщества.

Ярким примером является принятие и реализация Плана мероприятий по стимулированию спроса на продукцию высоких переделов из алюминия на 2016–2017 гг., утвержденного Председателем Правительства Российской Федерации Д. А. Медведевым от 28 ноября 2016 г. № 9311 п-П9, который предполагает утверждение инициатив по тарифным и нетарифным методам регулирования внешнеэкономической деятельности, разработку предложений по мерам, направленным на увеличение потребления алюминия в различных сферах деятельности, совершенствование документов по стандартизации и поддержку отечественных производителей продукции из алюминия.

Оценка суммарного прироста общего потребления алюминия и алюминиевых продуктов в результате выполнения утвержденного Плана мероприятий составит не менее 505 тыс. т к 2020 г.

Также имеют действие государственные программы увеличения спроса за счет стимулирования обновления устаревшего парка и создания мотивации у владельцев сдавать старую технику (вагоностроение, судостроение, автопром, сельскохозяйственное машиностроение).

ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ

Проанализировав целый ряд новых технологических, технических и управленческих решений, которые обсуждаются как в зарубежных странах, так и в России, можно сделать вывод, что железорудная промышленность будет развиваться в сторону решений, направленных на повышение эффективности производства, сокращение негативного воздействия на окружающую среду, оптимизацию ресурсопотребления.

Далее в тексте эти решения описаны применительно к добыче и обогащению железных руд.

Конвейерный транспорт

Применение конвейерного транспорта при транспортировке горной массы из железорудных карьеров. В настоящее время крупные железорудные карьеры вывозят горную массу из карьеров автомобильным и железнодорожным транспортом. Горная масса из забоев грузится на автомобильный транспорт, везется на перегрузочные пункты, где вновь погрузочными машинами (экскаваторы, погрузчики) грузится на железнодорожный транспорт, который, в свою очередь, транспортирует ее из карьера: руду — на фабрику, вскрышные породы — на отвалы. Переход на конвейерный транспорт позволит снизить неорганизованные выбросы перегрузочных пунктов, уменьшив их количество или вообще исключив, а также количество одновременно работающей погрузочной техники, количество технологических поездов и эксплуатационные затраты на транспортировку горной массы. Предпроектные проработки показывали снижение эксплуатационных затрат при транспортировке 1 т на 1 км более чем на 25%.

Беспилотные автосамосвалы

В настоящее время на железорудных предприятиях Западной Австралии действует несколько карьеров полностью с беспилотными большегрузными автосамосвалами. Самосвалы работают в режиме 24/7 в течение года, что экономит недропользователю 500 ч работы в год. Грузовики управляются дистанционно из операционного центра в Перте, который находится от Пилбары в 1200 км. Каждый карьерный робот-самосвал весом в 500 т движется со скоростью 50 км/ч — почти в 2 раза выше, чем с опытным водителем. Точность ориентации роботов — 1–2 см. Отсутствует время на пересменки, обеды. Это позволяет повысить производительность труда, снизить простои, удельный расход топлива и удельные выбросы.

Беспилотные тяговые агрегаты

Применение беспилотных тяговых агрегатов внутри карьеров и на поверхности. Отсутствует время на пересменки, обеды. Это повышает производительность труда, снижает простои и удельные расходы электроэнергии. Повышение надежности работы оборудования за счет исключения нарушений технологической дисциплины, превышений скорости, проездов на запрещающий сигнал светофора и т. д. В Rio Tinto (крупнейшей горнодобывающей компании Австралии) подсчитали, что перевод 40% железнодорожного транспорта на автоматику позволит уменьшить расходы на 2 долларов на тонне железной руды и увеличить ее добычу на 5%.

Автоматизированная система управления буровыми работами и зарядными машинами

Внедрение автоматизированной системы управления буровыми работами и зарядными машинами позволит сократить время наведения станков на скважину, позволит формировать пакет физико-механических характеристик обуриваемого блока, позволит повысить оперативный контроль за техническим состоянием бурового оборудования. Полученная с АСУ БР информация позволит в реальном времени корректировать буровые работы на отработываемом блоке, а также даст информацию по нижележащему блоку, что позволит существенно повысить качество планирования взрывных работ, снизить расход ВВ и увеличить выход горной массы. Автоматизированное управление зарядными машинами позволит автоматически формировать потребность в зарядке скважины и производстве взрывчатых веществ, сократит перерасход взрывчатых веществ.

Применение систем высокоточного позиционирования ковша для забойных экскаваторов

Системы высокоточного позиционирования ковша экскаватора позволят в режиме реального времени с сантиметровой точностью позиционировать ковш экскаватора, обеспечивая высокоточную выемку и формирование проектной формы рельефа (отвалов, уступов, дорог), обеспечат отображение электронных проектов рабочих зон на дисплее оператора, отображение профилей фактической и проектной поверхностей, наложенных друг на друга для контроля достижения проектных значений. Данное мероприятие позволит сократить потери и засорение руды, повысить точность выполнения плановых показателей качества, обеспечить необходимый уровень шихтовки, снизить потребление электроэнергии при производстве добычных работ.

Применение беспилотных летательных аппаратов для производства маркшейдерских работ

Применение беспилотных летательных аппаратов для производства маркшейдерских работ позволит оперативно решать задачи картирования, оценки объемов горных выработок и отвалов при отработке месторождения открытым способом, повысить контроль за технологическими процессами в реальном времени, повысить качество планирования горных работ, ускорить процесс закрытия периода и подготовки отчетов для контролирующих органов. Данная технология позволит сократить ресурсы для производства маркшейдерских работ.

Автоматизация процессов добычных работ в подземных условиях

Шахтная автоматизация обеспечит рациональную загрузку парка транспортных средств погрузочно-доставочных операций, оптимизацию параметров откатки, автоматизацию процессов бурения одной или нескольких скважин, вееров или забоя выработки, лучшие условия работы и безопасность, повышение производительности труда.

Безопасность обеспечивается за счет разделения производственной зоны и системы управления. Один оператор может управлять (из безопасного места, в том числе, находясь

на поверхности) работой многих автоматизированных машин. Производственный цикл погрузки полуавтоматический. Откатка и разгрузка производится под управлением навигационной системы, а наполнение ковша управляется дистанционно. Машины оборудованы бортовой видеосистемой, мобильным терминалом для беспроводной связи и навигационной системой. Процесс включает в себя мониторинг производства и состояния парка в реальном режиме времени, а также контроль движения машин.

Данная технология позволит повысить производительность работ, сократить простои и пересменки оборудования, снизить удельное потребление электроэнергии и ресурсов.

Высокопроизводительная проходка горных выработок

Перспективная технология состоит в использовании проходческих комплексов для быстрой, безопасной и экономически эффективной проходки выработок различных профилей (в том числе малого сечения) по породам и рудам высокой крепости без использования буровзрывных работ.

В настоящее время проводятся полевые испытания на медных и платиновых месторождениях ЮАР.

Использование сплавов и износостойких материалов

Применение легких сплавов и специальных износостойких материалов для изготовления подъемных сосудов и их футеровки обеспечивает существенное снижение веса клетей и скипов, увеличение полезной емкости сосудов и веса поднимаемой горной массы без изменения конечной нагрузки, а также повышает производительность труда и сокращает расход электроэнергии.

Автоматизированный аппаратный контроль состояния ствола, подъемных сосудов, канатов

Система непрерывного аппаратного контроля позволяет в режиме реального времени осуществлять мониторинг состояния канатов, подъемных сосудов и армировки ствола. Использование данной системы повышает достоверность и оперативность оценки динамических и статических параметров системы «подъемный сосуд — жесткая армировка», канатов шахтных подъемных установок. Контроль осуществляется без нарушения режимов работы ШПУ, существенно уменьшается время проведения визуального контроля, а также исключается влияние человеческого фактора на оценку фактического состояния оборудования, режимов работы и конструкций. Система автоматизированного мониторинга канатов позволяет повысить эффективность эксплуатации подъемных установок, принимать решения о проведении ремонтных работ по необходимости, сокращает расход электроэнергии и повышает производительность труда.

Компенсация реактивной мощности

Подключение специальных устройств к электрической сети индуктивных нагрузок позволяет генерировать необходимую реактивную мощность. Это наиболее экономичный, простой и безопасный способ обеспечения требуемой реактивной мощности. Повышение коэффициента мощности обеспечивает:

- снижение или полное отсутствие платы за реактивную мощность;
- увеличение пропускной способности линий электропередач;
- разгрузку распределительных трансформаторов;
- снижение потерь активной мощности до нормального уровня;
- повышение напряжения у потребителей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Бондаренко, А. Ф.* Краткий очерк истории горного дела в допетровский период / А. Ф. Бондаренко // Сборник Русского исторического общества. К истории горного дела. — М., 2001. — № 6 (154). — С. 12–28.
2. *Гатинский, Ю. Г.* Горнодобывающая отрасль России: от первых рудознатцев до современной индустрии (к 300-летию горно-геологической службы) / Ю. Г. Гатинский, Н. А. Вишневская ; Государственный геологический музей им. В. И. Вернадского РАН. — Вестник Отделения наук о земле РАН. — 2000. — № 3(13). — С. 1–14.
3. ИТС 25–2017. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Добыча и обогащение железных руд. — М. : Бюро НДТ, 2017. — 247 с.
4. *Карпенко, З. Г.* Горная и металлургическая промышленность Западной Сибири в 1700–1860 годах / З. Г. Карпенко. — Новосибирск : Изд-во Сиб. отделения АН СССР, 1963.
5. *Левитский, Л. П.* О древних рудниках / Л. П. Левитский. — М. ; Л. : Госгеолгиздат, 1941.
6. *Ломоносов, М. В.* Первые основания металлургии или рудных дел / М. В. Ломоносов. — СПб., 1763.
7. *Малютин, Ю. С.* История недропользования в России с древних времен до эпохи Петра Первого / Ю. С. Малютин // Маркшейдерия и недропользование : научно-технический и производственный журнал : [сайт]. — URL: <http://geomar.ru/articles/history/139-subsurface-use-from-antiquity-to-peter.html> (дата обращения: 09.10.2019).
8. *Петров, И. М.* История золотодобычи в до-революционной России / И. М. Петров // Недропользование XXI век. — 2007. — № 6. — С. 83–88.
9. Сборник Русского исторического общества / [Редкол.: В. В. Каргалов (председатель) и др.]. — № 6 (154) : К истории горного дела. — М. : «Русская панорама», 2003.
10. *Трубецкой, К. Н.* Отрасль, которая определяет богатство страны. К 300-летию административного управления горным делом в России / К. Н. Трубецкой, Т. В. Глембоцкая // Вестник РАН. — 2000. — Т. 70, № 8. — С. 736–747.
11. *Хамитов Р. А.* Геология и горное дело Башкортостана: история и современность / Р. А. Хамитов // Недропользование XXI век. — 2007. — № 5. — С. 4–15.

ДОБЫЧА АЛЮМИНИЕВОГО СЫРЬЯ

Михаил Львович Рахманов

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
профессор, доктор технических наук

Ольга Сергеевна Ежова

Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики»,
старший инженер

ВВЕДЕНИЕ

Алюминий — один из наиболее распространенных в природе элементов, по содержанию в земной коре (7,45%) он уступает только кислороду и кремнию. Вследствие высокой химической активности алюминий в природе встречается только в связанном виде. Число минералов, содержащих алюминий, очень велико: по данным академика А. Е. Ферсмана, таких минералов насчитывается около 250. Ниже приведены наиболее важные из этих минералов с указанием содержания в них Al_2O_3 , %:

корунд Al_2O_3	— 100;
диаспор, бемит $Al_2O_3 \cdot H_2O$	— 85,0;
шпинель $Al_2O_3 \cdot MgO$	— 71,0;
гиббсит (гидрагиллит) $Al_2O_3 \cdot 3H_2O$	— 65,4;
кианит, андалузит, силлиманит $Al_2O_3 \cdot SiO_2$	— 63,0;
каолинит $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$	— 39,5;
серицит, мусковит $K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$	— 38,4;
алунит $K_2SO_4 \cdot Al_2(SO_4)_3 \cdot 4Al(OH)_3$	— 37,0;
анортит $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	— 36,7;
нефелин $(Na, K)_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$	— 32,3–35,9;
лейцит $K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2$	— 23,5;
альбит $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$	— 19,3;
ортоклаз $K_2O \cdot AlO_3 \cdot 6SiO_2$	— 18,4.

Основное алюминиевое сырье — бокситы, нефелины, алуниты, глины, каолины и кианиты. В перспективе возможно использование некоторых промышленных отходов — высокоглиноземистых зол, шлаков и хвостов от обогащения углей.

За рубежом практически весь алюминий получают из бокситовых руд. В России для производства алюминия, кроме бокситов, используют также нефелины и алуниты.

Боксит — сложная горная структура, состоящая из оксида алюминия, оксидов железа и кремния, сырье для получения глинозема и глиноземосодержащих огнеупоров. Содержание глинозема в промышленных бокситах колеблется от 40% до 60% и выше. Используется также в качестве флюса в черной металлургии. Бокситы являются важнейшей алюминиевой рудой, на которой, за немногими исключениями, базируется почти вся мировая алюминиевая промышленность.

Химический состав бокситов, в зависимости от минералогической формы гидроксида алюминия и количества примесей, колеблется в широких пределах. Качество бокситов, как и алюминиевой руды, определяется прежде всего содержанием в них глинозема и кремнезема: чем ниже содержание SiO_2 и больше Al_2O_3 , тем выше качество при прочих равных условиях.

Бокситовая руда представляет полиминеральную породу, в которой полезные минералы глинозема (гиббсит, бемит, диаспор) находятся в тесной парагенетической ассоциации и в разных количественных соотношениях с кремнеземсодержащими минералами (обычно каолинитом и шамозитом). Для месторождений бокситов характерно отсутствие визуальных границ между сортовой рудой и забалансовой бокситовой породой. Специфической особенностью бокситов является высокая дисперсность входящих в них минералов, что определяет бокситы как чрезвычайно сложный объект механического обогащения.

В Российской Федерации основную долю в общем балансе бокситового сырья составляют два типа месторождений бокситов — гиббситовые (мезозойские) и преимущественно бемитовые (палеозойские).

Гиббситовые бокситы мезозойских месторождений Приангарья (Верхотуровское, Киргитейское, Порожнинское), а также бемитовые бокситы палеозойских месторождений Северо-онежского бокситорудного района (Иксинское) и Среднего Тимана (Вежаю-Ворыквинское) обнаруживают, несмотря на различия в минеральном составе, значительное сходство в условиях залегания, в распространении и взаимоотношениях диалогических разновидностей бокситовых пород, а также в ряде их структурных особенностей. Различие, обусловленное возрастом, выражается во внешнем виде и физическом состоянии породы — практически все бокситовые породы палеозойского возраста, в отличие от мезозойских, в разной степени сцементированы или уплотнены.

Нефелины представлены большим разнообразием типов горных пород, основные из них — уртиты и сиениты.

При обогащении Кольских уртитов получают нефелиновый концентрат, содержащий два основных минерала: апатит и нефелин. При флотационном обогащении руды получают апатитовый концентрат и нефелиновые хвосты, направляемые на перечистку с получением нефелинового концентрата, поставляемого на алюминиевые предприятия.

Уртиты на Кия-Шалтырском месторождении перерабатывают без предварительного обогащения.

Вследствие относительно низкого содержания оксида алюминия и присутствия гидроксидов щелочных металлов нефелиновые концентраты и руды экономически выгодно перерабатывать на глинозем только по комплексной технологии с попутным извлечением соды и поташа.

Сиенитовая алюминиевая руда поступает в металлургическую переработку без предварительного обогащения. По содержанию ценных компонентов она уступает как нефелиновым концентратам, так и уртитам.

Переработка алунитов на глинозем целесообразна только при комплексном использовании всех ценных компонентов — оксида алюминия, серного ангидрида и гидроксидов щелочных металлов. Перспективным сырьем для получения алюминия являются глины, каолины, кианиты. В качестве резерва для расширения сырьевой базы алюминиевой промышленности считают хвосты некоторых обогатительных фабрик, золы и минеральную часть углей и глиноземистые шлаки восстановительной плавки железных руд.

АЛЮМИНИЕВОЕ СЫРЬЕ РОССИИ

Россия обладает крупной сырьевой базой бокситов, достигающей 1,4 млрд т, почти 80% которых подсчитаны по промышленным категориям А + В + С₁. В разрабатываемых и осваиваемых месторождениях заключено 513,5 млн т запасов промышленных категорий. Однако бокситы российских месторождений в основном низко- и среднесортные, трудно вскрываемые и, в отличие от легко вскрываемых гиббситовых бокситов Австралии, Гвинеи и других стран, сложены диаспором и бемитом в разных соотношениях. Из-за дефицита качественных бокситов в России для производства глинозема используются также нефелиновые руды.

Прогнозные ресурсы бокситов наиболее достоверной категории P_1 незначительны — всего 58,1 млн т. Перспективы наращивания ресурсного потенциала отсутствуют.

Таблица 4.1. Состояние сырьевой базы алюминиевого сырья Российской Федерации на 01.01.2018 г.

Прогнозные ресурсы	P_1	P_2	P_3
Бокситы			
Количество, млн т	58,1	39,2	0
Запасы	$A + B + C_1$	C_2	
Бокситы			
Количество, млн т	1110	282,4	
Доля распределенного фонда, %	45,7	56,9	
Нефелиновые руды			
Количество, млн т	4124,6	781,3	
Доля распределенного фонда, %	72,7	55,4	
Использование сырьевой базы алюминиевого сырья РФ в 2017 г., млн т			
Добыча из недр бокситов		6	
Добыча из недр нефелиновых руд		37,8	
Производство глинозема		2,8	
Импорт глинозема		4,4	
Производство первичного алюминия		3,7	
Экспорт необработанного алюминия		3,3	
Импорт необработанного алюминия		0,05	

Запасы бокситов составляют 1,4 млрд т, включая 1,125 млрд т категорий $A + B + C_1$, однако активно используется в разрабатываемых и подготавливаемых к эксплуатации месторождениях менее половины от этого количества — 518,37 млн т, что позволяет стране занимать пятое место в мире. Остальная часть запасов имеет низкое качество руд и/или глубокое залегание и нерентабельна для отработки. Прогнозные ресурсы бокситов незначительны (менее 100 млн т категорий P_1 и P_2).

Данные по запасам и распределению бокситов приведены на рис. 4.1 и в табл. 4.2.

Таблица 4.2. Запасы бокситов и объемы их добычи в России

Запасы		Добыча, млн т	Доля в мировой добыче, %
категория	млн т		
Запасы $A + B + C_1$ разрабатываемых и осваиваемых месторождений	518,4	6,85	2

Запасы наиболее качественных среди российских бокситов сосредоточены в Свердловской области и Республике Коми, при этом они не могут конкурировать с разрабатываемыми за рубежом как по минеральному составу, так и по глубине залегания, горно-геологическим и климатическим условиям разработки.

Государственным балансом запасов РФ учитывается 57 месторождений бокситов, из них 18 — только с забалансовыми запасами. В распределенном фонде недр находятся 13 объектов с наиболее качественными рудами. В нераспределенном фонде учитывается крупное Висловское месторождение в Белгородской области и другие объекты меньшего масштаба с низкокачественными рудами, либо находящиеся в малоосвоенных районах.

Данные по основным месторождениям бокситов в России приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3. Основные месторождения бокситов в России

Недропользователь, месторождение	Геолого-промышленный тип	Запасы, млн т		Доля в балансовых запасах РФ, %	Кремневый модуль, Al_2O_3/SiO_2	Добыча, тыс. т
		A + B + C ₁	C ₂			
Черемуховское (Свердловская область)	Осадочный в карбонатных толщах	136,2	56,8	13,7	11,8	358
Ново-Кальинское (Свердловская область)	Осадочный в карбонатных толщах	74,6	30,2	7,4	17,7	532
Кальинское (Свердловская область)	Осадочный в карбонатных толщах	31,4	48,5	5,7	20,6	646
Красная Шапочка (Свердловская область)	Осадочный в карбонатных толщах	9,6	16,8	1,9	13,3	782
Вежаю-Ворыквинское (Республика Коми)	Полигенный	101,5	2,7	7,4	6,8	2886
Иксинское, Беловодская залежь, Западный участок (Архангельская область)	Осадочный в терригенных толщах	253,9	0	18	3,1	443
Висловское (Белгородская область)	Латеритный	153,4	49,0	11,0	6,0	0

Россия входит в десятку основных продуцентов бокситов, занимая восьмое место в мире и обеспечивая немногим более 2% мировой добычи.

В 2015 г. на семи месторождениях страны добыто 5,661 млн т бокситов — на 6,5% меньше, чем годом ранее. Основная часть бокситов (92%) извлечена из недр компанией «Объединенная компания «РУСАЛ».

Россия — единственная страна в мире, использующая в качестве алюминиевого сырья нефелиновые руды; из них выпускается треть отечественного глинозема.

По качеству нефелиновые руды значительно уступают бокситам — в них содержится от 11 до 28% Al_2O_3 и более 40% SiO_2 , поэтому их переработка в глинозем может вестись только способом спекания.

Запасы нефелиновых руд огромны и составляют почти 5 млрд т. Они разведаны в Мурманской области и в Красноярском крае, Кемеровской области и Республике Тыва.

Распределение и основные запасы нефелиновых руд приведены на рис. 4.1 и в табл. 4.4.

Таблица 4.4. Основные месторождения нефелиновых руд в России

Недропользователь, месторождение	Геолого-промышленный тип	Запасы, млн т		Доля в балансовых запасах РФ, %	Содержание Al_2O_3 , %	Добыча в 2015 г., млн т
		A + B + C ₁	C ₂			
Хибинская группа месторождений (Мурманская область)	Апатит-нефелиновые руды	3379,3	446,1	77,0	12,77	28,55
Кия-Шалтырское (Кемеровская область)	Уртиты	59,4	0	1,2	27,78	2,85
Горячегорское (Красноярский край)	Тералито-сиениты	445,9	292,1	14,8	22,45	
Баянкольское (Республика Тыва)	Уртиты	304,7	41,4	7,0	26,52	

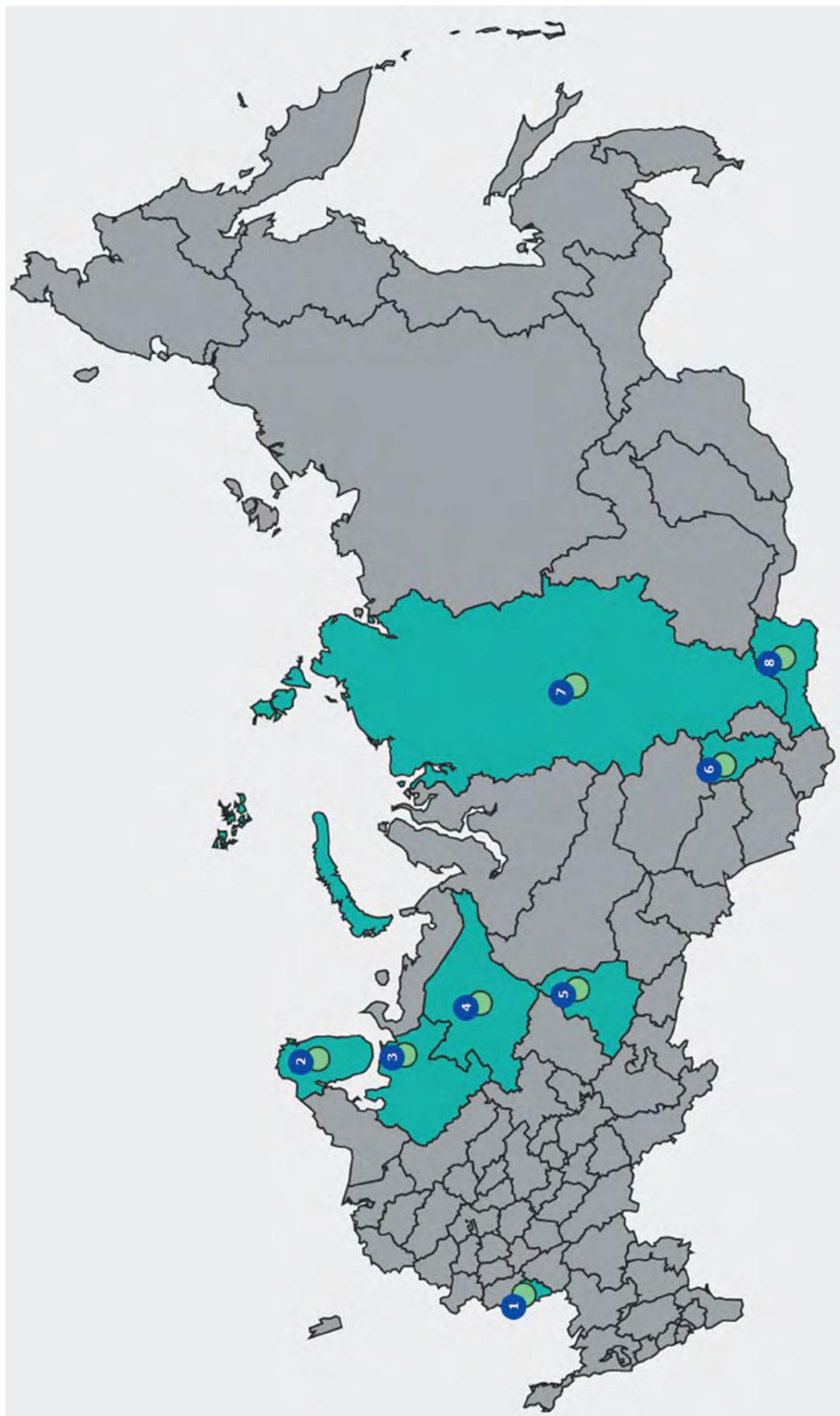


Рис. 4.1. Карта-схема расположения месторождений алюминиевого сырья в Российской Федерации:

- 1 — Белгородская область (Висловское); 2 — Мурманская область (Хибинская группа месторождений); 3 — Архангельская область (Иксинское); 4 — Республика Коми (Вежаю-Ворыкинское); 5 — Свердловская область (Черемуховское, Ново-Кальинское, Кальинское, Красная Шапочка); 6 — Кемеровская область (Кия-Шалтырское); 7 — Красноярский край (Горячегорское); 8 — Республика Тыва (Баянкольское)

Государственным балансом запасов РФ учитывается 17 месторождений нефелиновых руд, из них 4 — только с забалансовыми запасами. Имея крупную алюминиевую промышленность, Россия обеспечивает ее отечественным сырьем только на одну треть.

Россия обладает крупной сырьевой базой низкокачественного алюминиевого сырья — бокситов, нефелиновых руд, лейцитов, анортозитов, руд, содержащих минералы группы силлиманита, каолиновых глин. Внедрение в промышленное производство новых современных технологий переработки такого сырья позволит полнее удовлетворять нужды российской алюминиевой промышленности.

ИСТОРИЯ ЗАРОЖДЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Зарождение алюминиевой промышленности в мире

Впервые алюминиевую руду добыли в первой половине XIX в. на юго-востоке Франции, возле местечка Бокс. Отсюда и происходит название бокситов. Сначала эта отрасль промышленности развивалась медленными темпами. Но когда человечество оценило, насколько алюминиевая руда полезна для производства, сферы применения алюминия существенно расширились. Многие страны начали поиски на своих территориях месторождений этой руды. Таким образом, мировая добыча алюминиевых руд стала постепенно возрастать. Подтверждением этого факта являются цифры. Так, если в 1913 г. общемировой объем добытой руды составлял 540 тыс. т, то в 2014 г. — более 180 млн т.

Также постепенно росло количество стран, добывающих алюминиевую руду. На сегодняшний день их насчитывается около 30. Но на протяжении последних 100 лет ведущие страны и регионы постоянно менялись. Так, в начале XX в. мировыми лидерами по добыче алюминиевой руды и ее производству были Северная Америка и Западная Европа. На эти два региона приходилось около 98% общемировой добычи. Через несколько десятков лет по количественным показателям алюминиевой промышленности лидерами стали страны Восточной Европы, Латинская Америка и Советский Союз. В 1950–1960-х гг. лидером по объему добычи стала Латинская Америка. А в 1980–1990-х гг. произошел стремительный прорыв в алюминиевой промышленности Австралии и Африки. В современной мировой тенденции основными странами-лидерами по добыче алюминия являются Австралия, Бразилия, Китай, Гвинея, Ямайка, Индия, Россия, Суринам, Венесуэла и Греция.

Зарождение алюминиевой промышленности в России

Собственной алюминиевой промышленности дореволюционная Россия не имела, месторождения бокситов в стране не были известны.

Только накануне Октябрьской революции были открыты тихвинские бокситы, изучение которых началось уже в советское время.

Важным достижением советской геологии явилось открытие бокситов на Урале. Это позволило создать в стране ряд крупнейших глиноземно-алюминиевых заводов (Уральский, Богословский, Новокузнецкий) и развить отечественное производство алюминия. Главные месторождения бокситов сосредоточены в Свердловской области среди палеозойских отложений Тагильского (Зеленокаменного) синклинория.

В 1929 г. в Алапаевском и Режевском районах этой области геолог Н. И. Архангельский открыл небольшие залежи бокситов в континентальных отложениях мезозоя. Через год месторождения железистых бокситов были найдены и в Каменском районе Свердловской области (Колчеданское, Бурнинское, Борисовское; там же в 1932 г. — Соколовское).

Более крупные открытия относятся к 1931 г. Просматривая в течение ряда лет образцы руд, хранящиеся в известном Федоровском музее города Краснотурьинска (теперь

краеведческий музей, филиал Свердловского краеведческого музея), уральский геолог Н. А. Каржавин установил, что «убогие железные руды», изученные в конце прошлого столетия Е. С. Федоровым и признанные им непригодными к эксплуатации, в действительности представляют собой бокситовую руду с высоким содержанием окиси алюминия.

Через год в этом районе начались поисковые работы. Первое разведанное месторождение получило название Красная Шапочка за красный цвет породы, выходящей на поверхность (рудники Южный — главное рудное поле, Второй и Третий Северные). Накануне Великой Отечественной войны в северном направлении от главного рудного поля были открыты Кальинское, Черемуховское, а затем Сосьвинское месторождения, образующие единый Северо-Уральский бассейн — СУБР. Месторождение связано с известняками силура и девона, среди них имеются так называемые диаспоровые бокситы, содержащие до 54% глинозема и лишь 2–5% кремнезема. В годы Великой Отечественной войны уральские бокситы СУБРа обеспечивали производство алюминия на всех основных заводах страны.

По качеству североуральские бокситы — одни из лучших в стране: они высокоглиноземисты и однородны по составу. Серьезные трудности создает большая обводненность рудных полей, приуроченных к закарстованным известнякам.

В 1935 г. на западном склоне Южного Урала, между реками Ай и Юрюзань, А. К. Белоусов открыл Южно-Уральское месторождение бокситов, также используемых в промышленности, — ЮБР. Бокситы здесь связаны с породами верхнего девона. Наиболее крупное из месторождений — Ново-Пристанское, бокситы которого богаты глиноземом и содержат до 6–12% кремнезема, что отличает его от месторождений СУБРа. За последние 25–30 лет границы ЮБРа расширены месторождениями Блиновско-Каменское, Кургазакское и другими. В самые последние годы группой геологов в бассейне реки Щучьей (Полярный Урал) найдены палеозойские бокситы. По качеству они не уступают североуральским. Их открытие привело к поискам алюминиевого сырья на всем обширном участке восточного склона Урала — от Североуральска до Салехарда.

Большой вклад в изучение уральских бокситов внесли Д. Н. Наливкин, А. В. Пейве, Н. А. Каржавин, О. А. Ткаченко, Е. С. Гуткин, А. К. Белоусов, И. Г. Можжерин, И. И. Плотников, А. Н. Ходаевич и другие уральские геологи. По запасам сырья и степени освоения уральские бокситы — главная база алюминиевой промышленности России.

ЦИКЛЫ РАЗВИТИЯ АЛЮМИНИЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В сравнении с традиционными металлами (сталью, медью, бронзой) алюминий молодой металл. Современный способ его получения был разработан только в 1886 г., а до этого он был очень редким. Промышленные масштабы получения и добычи «крылатого» металла начались лишь в XX в. Сегодня это один из востребованных материалов в различных отраслях от электроники до космической и авиационной промышленности.

Историю развития добычи алюминиевой руды можно условно разделить на этап зарождения, характеризующийся локальными случаями добычи и использования алюминия, и промышленный период развития алюминиевой отрасли.

Впервые алюминиевая руда в виде серебристого металла была получена в 1825 г. в объеме всего лишь нескольких миллиграммов, и до появления массового производства этот металл был дороже золота. Например, одна из королевских корон Швеции имела в своем составе алюминий, а Д. И. Менделеев в 1889 г. получил от британцев дорогой подарок — весы из золота и алюминия.

Дальнейшее развитие алюминиевой отрасли происходило благодаря постоянно растущему спросу, обусловленному технологическим прогрессом и развитием промышленности. По этой причине технологические циклы добычи алюминиевого сырья можно соотнести с основными циклами развития мировой горнодобывающей промышленности (табл. 4.5, 4.6).

Таблица 4.5. Характеристика технологических циклов развития алюминиевой промышленности

Период, годы	Цикл	Направление использования	Технологические лидеры
1825–1890	Первый (ранняя добыча алюминиевого сырья)	Украшения, предметы искусства, посуда	Франция, Германия, США
1890–1935	Второй (начало промышленного развития)	Судостроение, скульптуры, железнодорожный транспорт, автомобилестроение, авиация	США, Франция, Италия
1935–1965	Третий (начало механизации добычи)	Судостроение, железнодорожный транспорт, автомобилестроение, авиация	Ямайка, Суринам, Гайана
С 1965 г.	Четвертый (совершенствование технологий добычи)	Судостроение, железнодорожный транспорт, автомобилестроение, авиация, космос, строительство	Австралия, Гвинея

Таблица 4.6. Основные этапы циклов развития алюминиевой промышленности

Цикл	Научно-технический этап	Технико-экономический этап	Экономическо-социальный этап	Социально-регуляторный этап
Первый (ранняя добыча алюминиевого сырья)	Применение горных механизмов	Увеличение объемов и производительности добычи алюминиевого сырья	Рост потребления алюминиевого сырья	Рост численности рабочих при сохранении тяжелых условий труда
Второй (начало промышленного развития)	Применение горных машин с простейшим приводом	Увеличение объемов и производительности добычи, развитие открытой добычи	Активное развитие промышленности	Рост численности и квалификации работников, улучшение условий труда
Третий (начало механизации добычи)	Применение горных машин с паровым универсальным двигателем и комбинированных горных машин	Увеличение объемов и производительности добычи, развитие обогащения	Рост потребления алюминия в промышленности	Рост квалификации работников, улучшение условий труда
Четвертый (совершенствование технологий добычи)	Применение комплексно-механизированных и автоматизированных горных машинных систем	Увеличение производительности добычи	Ужесточение природоохранного законодательства, отказ от неэкологических технологий	Сокращение численности работников, переход на удаленное управление процессом добычи

Первый технологический цикл

Похожий на серебро, легкий и дорогой, алюминий в первое время считался элитным материалом. Развитие добычи алюминиевого сырья начинается с применения горных механизмов. Однако их уровень оставлял низкими темпы роста производительности труда.

Использование алюминия в украшениях, предметах искусства, а впоследствии и в изготовлении посуды, которая почти полностью вытеснила чугунную и медную, послужило росту потребления алюминиевого сырья и развитию его добычи.

Создание крупных машинных производств и развитие рыночных отношений потребовали решения транспортных проблем, что способствовало активному развитию железнодорожного транспорта (который, в свою очередь, также стал крупным потребителем алюминия).

В течение XIX в. разрабатывались технологии для повышения производительности труда в горнодобывающей промышленности. В 1835 г. в США был выдан патент на основную машину для открытого способа разработки — одноковшового парового экскаватора на рельсовом ходу, в 1852 г. в Англии — патент на дисковую врубовую машину для угольных шахт. В 1860 г. французский инженер М. Кувре изобретает многоковшовый экскаватор, а в 1864 г. в Великобритании изготовлена первая цепная (баровая) врубовая машина; в Германии в 1876 г. изобретен гидравлический станок вращательного бурения.

Второй технологический цикл

Второй технологический цикл характеризуется развитием промышленности.

Массовое потребление алюминия в судостроении, автомобилестроении и железнодорожном транспорте способствовало увеличению объемов добычи алюминиевого сырья.

Увеличение спроса на алюминий стимулирует развитие горного дела, в том числе горного оборудования. В США создан первый в мире драглайн для открытых горных работ. В Англии появляются скребковые и ленточные конвейеры, а в Германии — качающиеся конвейеры для транспортировки добытого угля.

Для сокращения затрат по добыче алюминиевого сырья начинает широко применяться буровзрывная выемка с механизированной зарубкой.

Третий технологический цикл

Третий цикл характеризуется качественным и количественным расширением областей применения алюминия. Алюминий начинают активно применять в авиации и в строительстве. Технологическое развитие горной промышленности в течение данного цикла было направлено на совершенствование технологий добычи. В частности, были внедрены узкозахватная выемка комбайнами и стругами с индивидуальной металлической крепью и комплексно-механизированная выемка комбайнами и стругами с гидрофицированной металлической крепью.

Четвертый технологический цикл

Стремительный рост энергопотребления и возрастающее внимание к проблемам экологии привели к необходимости энергосбережения и постепенной переориентации отдельных стран на источники энергии, оказывающие наименьшее воздействие на окружающую среду. Это приводит к постепенному отказу отдельных стран от угольного топлива в пользу более экологичных источников энергии.

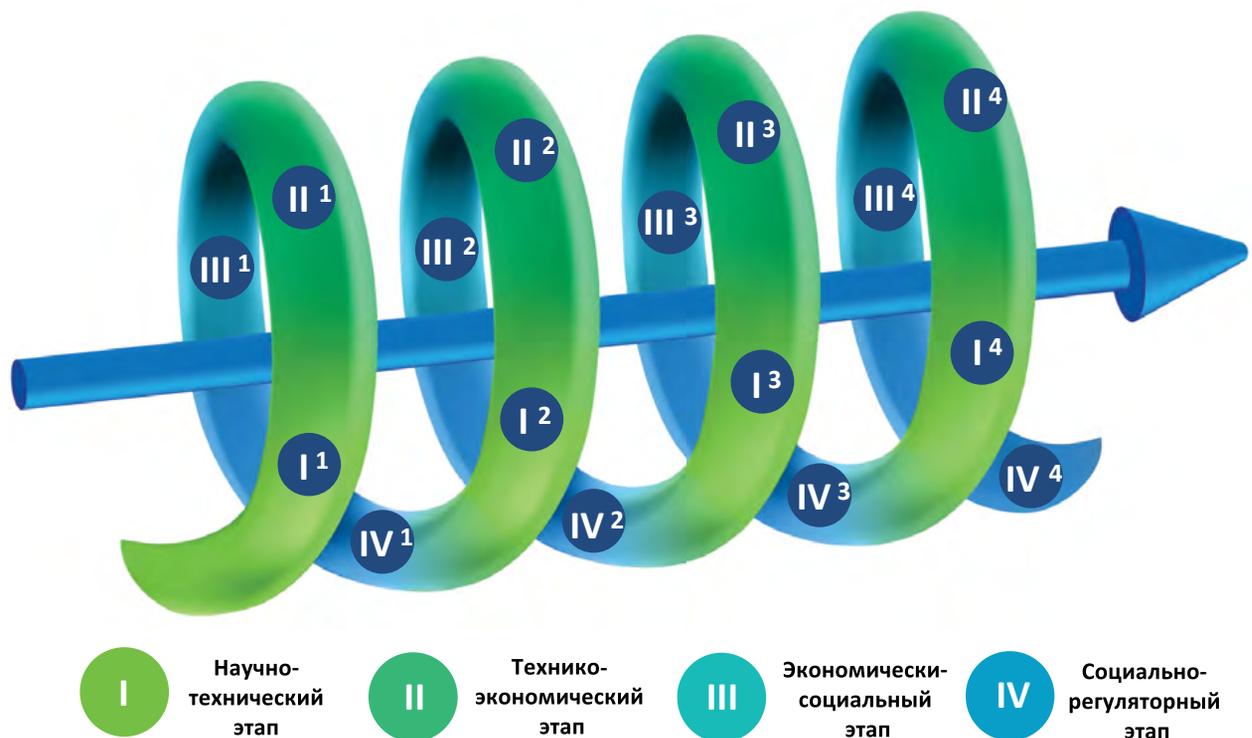
Данный технологический цикл, который продолжается по настоящее время, направлен на сокращение выбросов и повышение ресурсо- и энергосбережения. Развитие автоматизированных систем управления повышает степень автоматизации процесса добычи.

Эволюция технологий добычи алюминиевого сырья

Стоит отметить, что каждый цикл развития обусловлен определенным этапом, дающим новый толчок к развитию технологий. Последовательное прохождение всех этапов приводит к завершению цикла развития отрасли, после чего цикл повторяется.

Ресурсоэффективность в рамках исторического развития отраслей промышленности рассматривается как важнейший фундаментальный концепт перехода технологического

развития на новый уровень. При этом метод исследования сосредоточен на изучении реакции отрасли как целого на изменяющиеся условия, без подробного описания механизма работы и внутреннего устройства той или иной технологии, так как в рамках поставленной задачи это не является первостепенным объектом изучения.



- | | |
|--|---|
| I¹ — применение горных механизмов | I³ — применение горных машин с паровыми универсальными двигателями и комбинированных горных машин |
| II¹ — увеличение объемов и производительности добычи алюминиевого сырья | II³ — увеличение объемов и производительности добычи, развитие обогащения |
| III¹ — рост потребления алюминиевого сырья | III³ — рост потребления алюминия в промышленности |
| IV¹ — рост численности рабочих при сохранении тяжелых условий труда | IV³ — рост квалификации работников, улучшение условий труда |
| I² — применение горных машин с простейшим приводом | I⁴ — применение комплексно-механизированных и автоматизированных горных машинных систем |
| II² — увеличение объемов и производительности добычи, развитие открытой добычи | II⁴ — увеличение производительности добычи |
| III² — активное развитие промышленности | III⁴ — ужесточение природоохранного законодательства, отказ от неэкологических технологий |
| IV² — рост численности и квалификации работников, улучшение условий труда | IV⁴ — сокращение численности работников, переход на удаленное управление процессом добычи |

Рис. 4.2. Эволюция технологий добычи алюминиевого сырья

ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ДОБЫЧИ АЛЮМИНИЕВОГО СЫРЬЯ

В настоящее время добыча алюминиевого сырья осуществляется подземным (шахтным) или открытым (на карьерах) способом в зависимости от глубины залегания породы (в отдельных случаях возможна комбинированная разработка месторождений).

Добыча открытым способом

Открытая разработка месторождения включает в себя: подготовку поверхности, осушение месторождения, горно-капитальные работы по вскрытию и подготовке к добыче, в том числе вскрытие путем удаления вмещающих руду пустых пород, и добычные работы (рис. 4.3).



Рис. 4.3. Схема технологического процесса добычи алюминиевого сырья открытым способом

Основные процессы открытых горных работ: снятие почвы, вскрытие рудного тела, отделение руды от массива, транспортировка, первичная подготовка, складирование пород и некондиционного сырья.

Снятие и складирование почвы

Предприятия, разрабатывающие открытым способом месторождения руд цветных металлов, обязаны снимать плодородный слой почвы и использовать его для улучшения земельных угодий. Снятие плодородного слоя почвы бульдозером осуществляется прирезками с созданием временного штабеля.

Почва грузится экскаваторами или погрузчиками и вывозится во временный отвал или к месту использования. При снятии почвы с древесной и кустарниковой растительностью осуществляется предварительная уборка древесины и освобождение от пней и корней.

Почва в отвалах сохраняет свои свойства в течение 20 лет. Под отвалы отводятся участки с исключением подтопления, засоления или загрязнения промышленными отходами и строительным мусором.

Вскрытие

Вскрытие — это комплекс обеспечения доступа к руде путем производства горно-капитальных и текущих работ.

Горно-капитальные работы обеспечивают доступ к полезному ископаемому по железно-дорожным или автомобильным траншеям. Текущие вскрышные работы карьера обеспечивают объем добычи руды на запланированном уровне.

Покрывающие породы подразделяют на рыхлые и скальные. К рыхлым относят породы, выемка которых возможна при использовании экскаваторов и драглайнов без рыхления буровзрывным способом. Роторные экскаваторы непрерывного действия разрушают породу с помощью рабочих элементов роторного колеса и транспортируют ее в отвалы или склады.

При разработке рыхлых пород их отделяют от массива, транспортируют и укладывают в отвал при помощи воды под напором.

Породы рыхлой вскрыши разрабатывают драглайнами или экскаваторами. Для экскавации скальных пород требуется предварительное рыхление буровзрывным способом. На карьерах применяют гидравлические экскаваторы и экскаваторы типа механическая лопата. В процессе вскрытия покрывающие породы снимают и складывают в отвалы, обеспечивая доступ к руде.

Системы разработки

Параметрами карьера открытой добычи являются объем горной массы, конечная глубина, размеры по подошве, углы откосов бортов, запасы полезного ископаемого, объем вскрыши и полезного ископаемого, высота уступов, размеры на уровне дневной поверхности. Углы откосов бортов карьера определяются конструкцией бортов и условиями устойчивого равновесия слагающих его пород.

Горно-капитальные работы включают в себя проходку капитальных и разрезных траншей. Вскрытие месторождения осуществляют чаще всего с помощью капитальной траншеи.

Система разработки называется сплошной, если горно-подготовительные работы отсутствуют. При транспортной системе разработки вскрышных работ порода перемещается сначала во внешний отвал, а по мере развития горных работ — во внутренний отвал.

Вскрыша отрабатывается уступами, высота которых в слабых породах не должна превышать максимальную высоту черпания экскаватора, а в крепких породах — более чем в 1,5 раза.

Подготовка горных пород к выемке производится буровзрывным способом с дроблением до заданной крупности. Нужная крупность пород обеспечивается путем рассредоточения зарядов в скважинах большого диаметра. При необходимости получения породных блоков больших размеров небольшие заряды размещают на небольшом расстоянии друг от друга в скважинах малого диаметра.

Выемка горной массы осуществляется чаще всего торцовым забоем, который обеспечивает максимальную производительность экскаватора во взаимодействии с автотранспортом.

Карьерный транспорт является связующим звеном системы разработки. Затраты на него составляют не менее 50% от общих затрат на добычу.

При циклическом транспорте погрузка, движение с грузом, разгрузка и движение без груза осуществляются последовательно, а при транспорте непрерывного действия эти операции совмещаются.

Этапом производства вскрышных работ является образование отвалов. Высота отвального уступа зависит от физико-технических свойств складываемых пород, а количество уступов определяется отводимой площадью и объемом пород. В зависимости от места расположения отвала по отношению к конечному контуру карьера различают внутренние и внешние отвалы. Внешние отвалы располагаются ближе к карьере, чтобы уменьшить затраты на перемещение вскрыши.

Угол откоса отвальных уступов обычно равен углу естественного откоса пород отвала и зависит от физико-технических свойств пород, их разрыхления и влажности.

Фронтом отвальных работ называют часть участка приема и размещения вскрышных пород. Процесс отвалообразования включает возведение насыпей, разгрузку и складирование вскрышных пород, планировку поверхности и оборудование транспортных коммуникаций.

Веерное формирование отвалов осуществляется бульдозерами по транспортной схеме. По длине участка устраивается предохранительная берма шириной не менее 5 м. За призмой обрушения по длине фронта работ устраивается породная отсыпка высотой не менее 0,5 диаметра колеса применяемого автосамосвала.

Россыпи добывают драгами и гидравлическим способом. Добыча драгами осуществляется при соответствии параметров драги глубине залегания руд, возможностям водного бассейна и крупности руд.

Буровзрывные работы

Буровзрывные работы имеют целью подготовку скального массива к экскавации. Расчет параметров взрывания базируется на зависимости разрушенного объема породы от массы заряда взрывчатого вещества (ВВ). Свойства массива учитываются через удельный расход взрывчатого вещества, величина которого регламентируется. В большинстве случаев буровзрывное рыхление массива основано на расположении взрывчатого вещества в скважинах, пробуренных буровыми станками.

Бурение скважин производится буровыми станками шарошечного типа или ударно-шарошечного бурения. Диаметр взрывных скважин зависит от категории буримости породы, расстояния между скважинами, свойств ВВ и др. Скважины бурят на определенном расстоянии друг от друга в зависимости от типа пород, диаметра скважин, применяемого ВВ.

Отбойка скважинными зарядами заключается в размещении ВВ в скважинах с заполнением части скважины инертными материалами. Скважины размещаются на расстоянии друг от друга так, чтобы разрушения в каждой скважине перекрывали друг друга. Заряд ВВ в скважине может быть сплошным и рассредоточенным, что увеличивает эффективность использования ВВ.

Применяется многорядное, короткозамедленное взрывание с использованием пиротехнических замедлителей. Иницирование скважинных зарядов производится посредством промежуточных детонаторов, изготовленных из шашек-детонаторов и изделий неэлектрических средств иницирования или детонирующего шнура.

Добычные работы

Добыча руды осуществляется с использованием преимущественно одноковшовых экскаваторов типа ЭКГ с объемом ковша от 5 до 20 м³ и гидравлических экскаваторов типа прямая или обратная лопата с вместимостью ковша до 30 м³.

Разгрузка руды осуществляется в автосамосвалы или железнодорожные думпкары. Гидравлический экскаватор разгружает руду опрокидыванием или раскрытием ковша, канатный экскаватор — путем открывания днища ковша над местом разгрузки.

Максимальная производительность экскаватора достигается при минимуме передвижек в забое и минимальном среднем угле поворота экскаватора. Высота забоя ограничивается высотой черпания экскаватора. Угол откоса поверхности забоя зависит от свойств разрабатываемого массива и составляет 70–80°. При автомобильном транспорте автосамосвалы располагаются сбоку или позади экскаватора в зоне разгрузки ковша с минимальным углом разворота от места черпания. При конвейерном транспорте горная масса загружается экскаватором в бункер-питатель, который располагается с боку экскаватора или внутри заходки позади экскаватора.

Транспорт

Для перевозки вскрышных пород, руды и материалов используют транспорт непрерывного действия (конвейерный, трубопроводный) и циклического действия (железнодорожный, автомобильный). При большой производительности карьеров преимущественно применяется железнодорожный транспорт.

Конвейерный и трубопроводный транспорт обеспечивает поточность производства горных работ, автоматизацию управления и высокую производительность труда. Применение комплексов непрерывного действия повышает степень использования оборудования на карьере.

Для транспортирования мягких, дробленых, скальных и полускальных горных пород получили распространение ленточные конвейеры: забойные, сборочные, подъемные, магистральные и отвальные.

Забойные конвейеры предназначены для транспортирования горной массы от экскаватора до сборочного конвейера. Сборочные конвейеры в торцевых частях карьера предназначены для транспортирования горной породы от одного или нескольких забойных конвейеров к подъемнику. Подъемные конвейеры в нерабочей зоне карьера предназначены для доставки горной массы из рабочей зоны карьера на поверхность. Магистральные конвейеры располагаются на поверхности карьера и предназначены для транспортирования пород вскрыши к отвалам, а полезного ископаемого — на обогатительную фабрику или к складам. Отвальные конвейеры располагают на отвалах и перемещают вслед за отвальным фронтом.

Трубопроводный или гидравлический транспорт ограничен в применении по климатическим условиям, свойствам пород и наличию водоисточников.

Железнодорожные пути подразделяются на временные и стационарные. К временным относятся пути на рабочих площадках в карьере и на отвале. К стационарным относятся пути в траншеях, на транспортных бермах и на поверхности карьера. Скорость железнодорожного транспорта в карьере по стационарным путям составляет 35–40 км/ч, по забойным и обменным путям — 15–20 км/ч.

Широкое распространение имеет автомобильный транспорт благодаря мобильности, высокой эффективности в сложных топографических, геологических и климатических условиях. Наиболее эффективная область применения автомобильного транспорта — карьеры малой и средней производительности, глубокие горизонты крупных карьеров в комбинации с железнодорожным транспортом.

Первичное дробление используется для обеспечения возможности транспортировки дробленого материала конвейерным транспортом. Дробилки крупного дробления позволяют дробить руду на куски крупностью до 1500 мм. На выходе с дробильных установок крупность руды не превышает 400 мм, что позволяет производить ее транспортировку конвейерным транспортом. За дробилками первой стадии могут располагаться грохоты или дробилки, обеспечивающие дробление руды до крупности 150–200 мм для транспортировки ее крутонаклонными конвертами.

Обращение с породами

Объект из пустых, скальных и рыхлых пород называется породным отвалом, некондиционных руд — складами, плодородный слой почв укладывается в бурты.

Высота яруса отвала определяется свойствами пород, рельефом поверхности, гидрогеологическими условиями и технологией образования отвала. Укладка пород в отвалы производится бульдозерами. Автосамосвалы разгружаются на некотором расстоянии от бровки по периферии отвала, а бульдозеры перемещают породу под откос, оставляя на бровке предохранительный вал. Поверхность отвала имеет подъем в сторону откоса, равный 3°. Высота бульдозерного отвала достигает 25–30 м.

Отвалы устраиваются из расчета минимизации занятости земли и обеспечения к минеральной массе впоследствии.

Руды, не отвечающие требованиям кондиций, укладываются в отдельные отвалы.

Гидроотвалы представляют собой огороженные дамбами понижения рельефа, балки, овраги, выработанные пространства карьеров. Они заполняются из напорных трубопроводов. Твердые частицы и взвесь осаждаются на дно, а отстоявшаяся вода возвращается в систему напорного гидротранспорта.

Добыча подземным способом

Подземная разработка месторождений руд цветных металлов различных форм, мощности, углов падения, на разных глубинах осуществляется с использованием подземных горных выработок. Она включает этапы: вскрытие, подготовку и очистную выемку, которые выполняются последовательно или совмещенно во времени и пространстве с целью

обеспечения производства достаточными запасами вскрытых, подготовленных и готовых к выемке запасов полезного ископаемого.

Основные горные выработки:

- шахтные стволы, квершлагги и штольни, открывающие доступ ко всему месторождению или его части и обеспечивающие возможность проведения подготовительных выработок и очистной выемки в запланированных объемах;
- штреки, квершлагги, уклоны, бремсберги, восстающие, орты, которыми вскрытая часть месторождения разделяется на обособленные выемочные участки, предусмотренные принятым способом подготовки и системой разработки;
- подэтажные и слоевые выработки, выработки буровые, погрузочно-доставочные, подсечки, вентиляционные, отрезные восстающие, лавы и другие забойные выработки, обеспечивающие выемку полезных ископаемых.

Этапы подземной разработки месторождения: подготовка рудничного поля, отделение горной массы от массива, выдача на транспортные выработки и транспортирование на поверхность с размещением пород в выработанном пространстве или в отвалах.

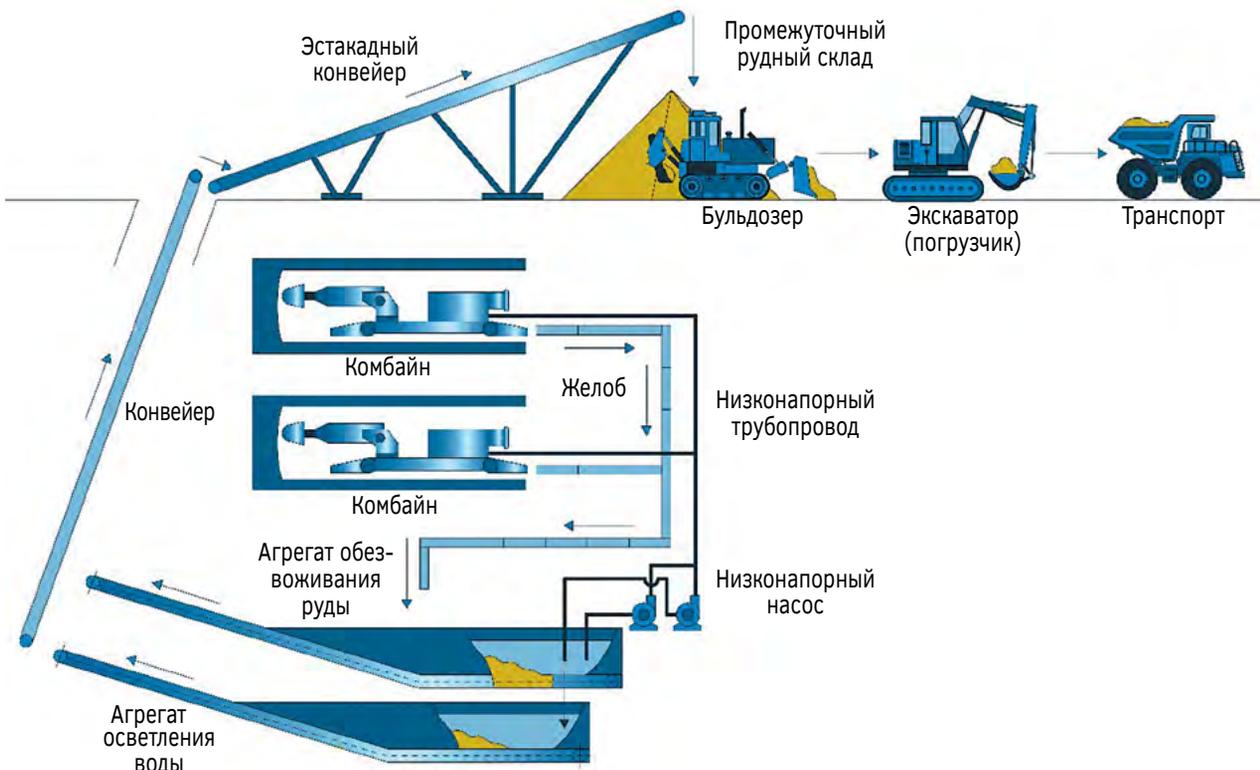


Рис. 4.4. Схема технологического процесса добычи алюминиевого сырья подземным способом использованием в забое самотечно-напорного гидротранспорта

Вскрытие

Вскрытие заключается в проведении шахтных стволов, квершлаггов, штолен, капитальных рудоспусков и др. для получения доступа к рудному телу.

Главные вскрывающие выработки служат для выдачи руды и пород на земную поверхность, вентиляции, перемещения людей, доставки материалов и оборудования. Вспомогательные выработки служат для вентиляции, транспорта оборудования, обеспечения дополнительного выхода на земную поверхность и других целей. Расположение главных и вспомогательных стволов определяется условиями проветривания.

Форма, размеры, способы проведения, крепления выработок вскрытия зависят от срока их службы, оптимальной работы транспорта, безопасности передвижения людей, доставки материалов и оборудования, а также пропуска необходимого количества воздуха.

Простые способы вскрытия: вертикальным шахтным стволом по рудному телу, по породам лежачего бока, по породам висячего бока; наклонным шахтным стволом по породам лежачего бока и на флангах месторождения; штольной по рудному телу или по породам боков рудного тела.

Комбинированные способы сочетают два или более способов вскрытия, например: вертикальный шахтный ствол с поверхности и вертикальный слепой ствол; вертикальный шахтный ствол и наклонный слепой ствол; штольня и вертикальный слепой ствол; штольня и слепой наклонный ствол.

Штольня в качестве вскрывающей выработки используется при вскрытии в гористой местности. Строительство штольни дешевле, скорость проходки выше, транспортирование руды дешевле и осуществляется без перегрузки, передвижение людей безопаснее, шахтные воды выдаются самотеком, стоимость поверхностных сооружений меньше.

Шахтные стволы имеют круглую, прямоугольную и эллиптическую форму сечения. Размер сечения ствола зависит от его назначения. Капитальные стволы служат для подъема руды и породы, подъема и спуска людей, спуска материалов, вентиляции и размещения водоотливных и воздушных труб, но иногда только для подъема руды и породы, только для спуска-подъема людей, только для вентиляции и т. п.

Вскрытие наклонным стволом осуществляют в лежащем боку за пределами зоны сдвига пород или по месторождению. От ствола шахты до границы рудного тела проходят квершлагги, длина которых значительно меньше, чем при вскрытии вертикальным стволом, что является основным достоинством способа.

Комбинированные способы вскрытия сочетают разнотипные вскрывающие выработки: верхнюю часть месторождения вскрывают одной выработкой, а нижнюю — другой. Такое вскрытие характерно для месторождений, расположенных в гористой местности или ниже уровня вскрытия штольной. В этом случае их вскрывают слепым стволом. При ступенчатом вскрытии длина квершлаггов уменьшается.

Рудные тела крутого падения вскрывают вертикальными стволами в сочетании с наклонным съездом для передвижения самоходного оборудования. Выбор схемы вскрытия производят с учетом геологических условий, производительности, срока существования и возможности применения высокопроизводительной техники. Так получили распространение наклонные автомобильные съезды.

Околоствольные дворы с комплектом выработок строят на каждом этаже, но иногда применяют вскрытие групповыми квершлаггами через два-три этажа. Ствол и откаточные выработки этажей связываются вертикальными и наклонными выработками. Для доставки материалов и оборудования и перемещения людей проходят восстающие с клетевым или лифтовым подъемом.

Целесообразность вариантов вскрытия оценивают путем технико-экономического сравнения. Выбирается тот, при котором обеспечивается наибольшая безопасность работ и меньшие затраты.

Место заложения главной вскрывающей выработки по простиранию месторождения должно быть оптимальным в отношении работы подземного транспорта в течение всего времени отработки запасов, удобства расположения поверхностных сооружений и подъездных путей, сохранности от рисков паводковых и дождевых вод, оползней, лавин и т. д.

Разделение рудничного поля на этажи производят штреками и ортами. Восстающими и наклонными выработками этажи делят на выемочные блоки. Высота этажа составляет 60–120 м. Иногда этажи делят по высоте на подэтажи.

Восстающие выработки проходят способом секционного взрывания скважин или шпуров. Проходку вертикальных восстающих выработок механизуют применением

комплексов типа КПВ, где полук перемещается по монорельсу. Проходка бурением и расширением скважин производится с использованием буровых станков типа 2 КВ. Станки обеспечивают проведение вертикальных и наклонных выработок диаметром до 3 м, до 100 м в длину под углом до 70° в породах с коэффициентом крепости до 12 по шкале проф. М. М. Протодьяконова. Горные выработки, проведенные в подготовленных участках для выемки руды, называют нарезными.

Нарезные выработки делят блок на подэтажи, служат для доставки отбитой руды и ее вторичного дробления, обнажения руды в днище блока и отрезки блока от массива.

В выработках выемочного участка оставляют рудные целики, возводятся искусственные сооружения и устройства: крепь, грохоты, люки, погрузочные полки, бетонные, металлические или железобетонные облицовки сопряжений выработок выпуска и вторичного дробления и др.

Системы разработки

Система разработки рудных месторождений подземным способом — порядок и технология очистной выемки руды, определяющие совокупность конструктивных элементов выемочного участка, технологических процессов и способ управления горным давлением, увязанные во времени и пространстве.

Готовые к выемке — это запасы руды, в которых пройдены нарезные выработки для производства очистной выемки.

Очистная выемка — комплекс работ по извлечению руды из очистных забоев, включающий отбойку, погрузку, доставку руды из забоя до откаточного горизонта, поддержание выработанного пространства и управление кровлей. Очистное пространство в процессе очистной выемки оставляют открытым, заполняют отбитой рудой, закладкой или обрушенными породами или поддерживают крепью и целиками.

Крутопадающие жилы и пластообразные залежи мощностью до 3 м отрабатывают с потлокуступной и почвоуступной выемкой.

При разработке горизонтальных и пологопадающих залежей средней и большой мощности до 30 м распространена камерно-столбовая система разработки с регулярными целиками.

Системы разработки с подэтажной выемкой применяют при разработке мощных крутопадающих месторождений. Камеры располагают по простиранию рудного тела при мощности до 15 м, вкрест простирания — при большей. Ширина междукамерных целиков — до 15 м. Расстояние по вертикали между подэтажными выработками — 10–12 м. Потолочину обрушают массовым взрывом вместе с днищем вышерасположенного блока.

Этажно-камерными системами разрабатывают мощные крутопадающие и наклонные месторождения. Полезное ископаемое отбивают горизонтальными, наклонными или вертикальными слоями.

При разработке мощных пологопадающих месторождений применяют варианты системы с твердеющей закладкой.

Системы разработки с креплением очистного пространства применяют при разработке месторождений средней мощности. При выемке горизонтальными слоями или потлокуступным забоем используют усиленную распорную крепь.

Крутопадающие и мощные залежи с неустойчивой рудой и вмещающими породами разрабатывают системой слоевого обрушения нисходящими горизонтальными слоями высотой до 3 м.

Горизонтальные и пологопадающие пластообразные залежи мощностью до 5 м разрабатывают столбовыми системами с обрушением кровли.

Системы с обрушением руды и вмещающих пород применяют для разработки мощных залежей цветных металлов. При разработке крутопадающих залежей богатых руд, склонных к самообрушению, применяют варианты с выемкой руды под деревянным настилом.

Разработку мощных месторождений ведут комбинированно: камеры и целики извлекают одновременно или последовательно различными системами с подготовкой блоков по единой схеме.

Способы управления массивом классифицируют по принципу состояния выработанного пространства на время завершения работ по погашению, в отличие от классификации систем разработок в период очистной выемки.

При разработке мощных месторождений руд, способных при обнажении обрушаться, используют системы с естественным или принудительным самообрушением.

Скважинные технологии добычи руд

Месторождения склонных к растворению реагентами руд разрабатывают системами с выщелачиванием, комбинируя технологии по признаку максимального извлечения металлов.

Отбойка и дробление руд

Отбойку руд средней и высокой крепости ведут взрывным способом, а менее крепких — механическим способом с помощью комбайнов. При добыче слабых или трещиноватых руд в породах, способных при обнажении обрушаться под действием гравитации и давления налегающей толщи, используют феномен самообрушения.

Буровзрывной способ, использующий взрывание зарядов ВВ в шпурах, взрывных скважинах и минных выработках, является универсальным для отбойки руд средней и высокой крепости. Способ основан на быстротечном разложении веществ с использованием энергии взрыва на отделение от массива и дробление горной массы.

Шпуровая отбойка используется для отделения от массива полезного ископаемого небольшой крепости, а также для отбойки крепких руд при разработке рудных тел средней и малой мощности.

Отбойка скважинами распространена при разработке мощных рудных месторождений с высокой крепостью и устойчивостью руд и пород. Взрывные скважины бурят вертикальными, наклонными и горизонтальными так, чтобы руда перемещалась в сторону обнаженной поверхности.

Для увеличения глубины заложения и величины зарядов ВВ донную часть глубоких (5–6 м) шпуров взрыванием небольших зарядов расширяют до формы котла.

Эффективность взрывного дробления повышается: короткозамедленным взрыванием, использованием кинетической энергии соударения, рассредоточением зарядов воздушными промежутками, расположением скважинных зарядов.

При разработке мощных месторождений с крепкими и трещиноватыми рудами применяют отбойку зарядами ВВ, располагаемыми в минных выработках.

Отделение руд от массива путем обрушения в результате гравитационных сил и горного давления применяется при разработке мощных месторождений малоценных руд средней крепости и устойчивости.

При разработке слабых руд выемку осуществляют комбайнами и применяют гидравлическую отбойку.

Показателем оптимальности взрывной отбойки является крупность кусков разрушенного взрывом рудного массива. Если в результате отбойки отделяются крупные куски породы, не подлежащие транспортировке, их измельчают до кондиционных размеров. Размеры максимально допустимого куска в горной массе определяют параметрами транспортных средств, дробилок и другого оборудования. Максимально допустимый размер кусков варьируется от 300–400 мм до 800–1000 мм. Для дробления негабаритных кусков применяют взрывчатые вещества или механические устройства.

Качество отбойки и дробления улучшают изменением пространственного расположения зарядов относительно друг друга и свободной поверхности.

Вращательное бурение станками пневмоударного и шарошечного бурения с армированными твердыми сплавами коронками применяют в рудах с коэффициентом крепости до 6–8 по шкале проф. М. М. Протодьяконова.

Алмазное бурение взрывных скважин в крепких породах характеризуется хорошими показателями за счет стойкости коронок.

Пневмоударное бурение шпуров и скважин применяют при бурении крепких и весьма крепких руд и пород. Шпуры бурят перфораторами с пневмоподдержками, с фиксацией на пневмоколонках или закрепленными на станках. Для бурения выработок в породах с коэффициентом крепости до 14 применяют самоходные электрогидравлические станки.

Для бурения взрывных скважин и шпуров используют буровые перфораторы, станки, каретки и установки добычного бурения.

Для улучшения дробления руды и снижения сейсмического эффекта применяют короткозамедленное взрывание зарядов с интервалами: 25, 50, 75, 100 и 150 мс.

Промышленные ВВ для подземных горных работ: аммиачно-селитренные гранулированные, порошкообразные и эмульсионные ВВ. В гигроскопичные ВВ для придания водоустойчивости вводят специальные добавки. ВВ на основе водоустойчивой аммиачной селитры имеют марку ЖВ: аммониты № 6 ЖВ, а также тротил и др.

Для подземных работ применяют ВВ с кислородным балансом, близким к нулевому с минимизированным количеством оксида углерода CO и оксидов азота NO, NO₂, N₂O₃, и прочих вредных газов при взрыве.

Для заряжания используют самоходные, передвижные и переносные зарядные машины. ВВ транспортируется сжатым воздухом по зарядному шлангу в скважины и шпуры.

Доставка

Отбитая руда доставляется к местам ее погрузки в транспортирующие устройства. Под действием собственного веса она перемещается по почве выработки, рудоспускам, настилам, желобам, трубам с углом наклона выработки от 35 до 50°. Ограниченное применение имеют доставка силой взрыва и гидравлическая.

Механизированная доставка производится скреперами, конвейерами, самоходными вагонетками, погрузочно-доставочными машинами. Скреперная доставка используется для доставки руды от забоя до рудоспуска или погрузочного люка, а на горизонте скреперования — от рудоспусков до погрузочных полков. Ее достоинства: простота устройства, небольшая стоимость оборудования, мобильность, возможность совмещения доставки с погрузкой.

Доставка конвейерами применяется при малоабразивной мелкой руде с подъемом выработки под углом до 20°, иногда до 30–40°. Скребковые конвейеры, по сравнению с ленточными, имеют меньшую высоту, проще в обслуживании и допускают подъем материала до 35°. Виброконвейеры устанавливают под бетонированными выпускными выработками, но не под навалом руды.

При длине транспортирования до 500 м применяется доставка самоходными установками с электрическим, дизельным, дизель-электрическим и пневматическим двигателем. Перспективны машины с комбинированным электрогидравлическим приводом.

По способу разгрузки различают челночные вагонетки и самосвалы. Дном челночных вагонеток служит скребковый конвейер, разравнивающий и выгружающий транспортируемую руду.

Комплексы состоят из погрузочных машин и самоходных вагонов, а при большой производительности — экскаваторов или ковшовых погрузчиков и подземных автосамосвалов. Электрический привод позволяет снизить отрицательное влияние на окружающую среду.

Дизельный привод применяют на рудниках с активным проветриванием. Типы приводов сочетают, например, дизельный — для передвижения, электрический — для погрузки.

Машины с аккумуляторным приводом находят применение при отработке маломощных рудных тел сложной формы.

Машины вспомогательного назначения имеют самоходные шасси, автономный привод и необходимый набор навесных приспособлений — крюк, ковш и др.

Выпуск руды

Руду выпускают из днищ блоков или из торца горизонтальных выработок через люки, питатели, конвейеры и другие устройства.

Тип и параметры люка зависят от количества и свойств пропускаемой через него руды, срока службы, размеров откаточной выработки и емкости откаточного сосуда.

Люки с секторным затвором пригодны для погрузки руды крупностью до 300–400 мм. Люки с пальцевым затвором применяют для погрузки руды крупностью до 1000 мм. Пальцы опускаются под действием собственного веса, а поднимаются с помощью пневматического цилиндра. Комбинированные люки сочетают лотковый затвор с секторным, пальцевым или цепным.

При разработке с погрузкой руды в доставочные агрегаты или откаточные вагоны машинами ее выпускают на почву выработки. Погрузка руды в транспортные средства осуществляется погрузочными машинами, комбайнами, погрузчиками или малогабаритными экскаваторами.

Погрузочные машины имеют колесно-рельсовый, гусеничный и пневмошинный ход; пневматический, электрический, электрогидравлический или дизельный привод. На выпуске руды из блоков используют вибротехнику, существенно повышающую производительность. Передвижные вибрационные установки, работающие под навалом руды, сокращают потери руд в днище блока.

Поддержание выработанного пространства

В результате горных работ первоначальное равновесно-напряженное состояние пород нарушается. Вокруг горных выработок возникает поле напряжений — горное давление, формирующееся под влиянием глубины залегания, тектонической деятельности, анизотропии и упругости пород, давления газов и подземных вод и др.

В скальных породах прочностью от 50–100 до 100–150 МПа в зоне нарушенных пород коэффициент ослабления снижается с 0,25–0,35 до 0,15–0,04. Мощность зон вокруг выработок малого сечения составляет 0,5–2,0 м, вокруг крупных — 5–10 м. Внутри этих зон выделяется менее мощная приконтурная зона снижения ослабленности 0,5–1,5 м. В пределах зоны прочность уменьшается на величину в 2,5–6,0 раз. На контакте зоны влияния выработок напряжения увеличиваются до первоначального значения.

Напряжения в окрестностях выработки могут превысить прочность пород, тогда там образуется область, в которой происходят горные удары и выбросы.

Управление горным давлением — совокупность мероприятий по предупреждению негативных последствий проявления горного давления. Сохранность горных выработок обеспечивается приданием им наиболее устойчивой формы поперечного сечения или возведением в них крепи. Круглая форма принимается при высоком всестороннем давлении, сводчатая — при давлении сверху.

Поддержание выработанного пространства — сохранение его устойчивости путем подпора боков и кровли очистного пространства целиками, закладочным материалом, отбитой рудой или крепью.

В скальных породах нагрузка на крепь формируется за счет массы той части пород в кровле, которая в процессе формирования свода естественного равновесия испытывает неупругие деформации.

Деревянная крепь представляет собой прямоугольные или трапециевидные крепежные рамы, стойки и костры.

Металлическая крепь — стойки, штанги или сложные механизированные агрегаты, являющиеся составной частью выемочных комплексов.

Обрушение пород осуществляют с целью облегчения поддержания очистных выработок за счет перераспределения горного давления. Оптимальным считается такой порядок работ, при котором срок существования выработок минимален. Быстрое погашение блока позволяет увеличивать размеры очистных камер и уменьшать расходы на их поддержание.

При креплении пород применяют бетонную, каменную, смешанную и металлическую крепь в виде переносной или штанговой крепи, а также из полимерных материалов.

По конструкции деревянной крепи различают типы: распорная крепь — простая, усиленная, составная; костровая крепь; крепежные рамы; станковая крепь.

По характеру работы различают крепи: жесткая, податливая, шарнирная, комбинированная; по сроку службы: постоянная и временная; по форме сечения выработок: трапециевидная, арочная, кольцевая, эллиптическая, полигональная, сводчатой формы; по виду выработки — для горизонтальных, наклонных и вертикальных горных выработок.

Для поддержания очистных выработок после выемки руд применяют затвердевшую смесь раствора цемента с песком, щебнем или гравием. Для изменения свойств бетонов и растворов (подвижности, скорости твердения, водонепроницаемости, долговечности) в их состав вводят добавки.

Крепи, воспринимающие растягивающие усилия, изготавливают из бетона, армированного сталью, — железобетона. Шприц-бетон, набрызг-бетон и торкрет-бетон, состоящий из водной смеси цемента, песка и мелкого щебня, используют для покрытия пород с целью защиты от разрушения, коррозии и придания огнестойкости.

Металл используют редко, обычно для крепления устьевого части штолен, квершлагов и других выработок с большим сроком службы. Находят применение новые композитные крепежные материалы, в первую очередь стеклопластик.

Для крепления капитальных выработок с большим сроком службы применяют крепи: бетонные, железобетонные, сборные металлические и железобетонные (тюбинги), металлические рамы и др., воспринимающие нагрузку в пределах упругих деформаций без изменения формы и размеров.

Железобетонная крепь отличается от бетонной наличием металлической арматуры, позволяющей воспринимать растягивающие усилия. Наряду с монолитной бетонной крепью, применяют сборные железобетонные крепи: сплошную тюбинговую, арочные, кольцевые или эллиптические.

Податливые рамы изготавливают из спецпрофиля, соединяя их между собой хомутами и болтами, которые обеспечивают податливость крепи за счет скольжения в местах соединения. Смешанные рамные крепи состоят из железобетонных пустотелых стоек и металлических верхняков, соединяемых при помощи подвесной скобы.

Жесткие металлические крепи трапециевидной, арочной и кольцевой формы из двутавровых балок и рельсов с соединением элементов накладками и болтами устанавливают на расстоянии 0,5–1 м друг от друга. Кровлю и бока выработки между рамами закрывают затяжками — железобетонными плитами, металлическими решетками и сетками, досками.

Деревянную рамную крепь применяют в выработках небольшого сечения с небольшим сроком службы. Выработки со значительным сроком службы закрепляются негорючими материалами. Рамы устанавливают или вразбежку через 0,5–1 м с отшивкой кровли и боков выработки между рамами деревянными затяжками, или сплошную. Полные рамы с лежнем применяют при давлении со стороны почвы выработки.

Металлическая крепь может быть жесткой, податливой и шарнирной. Податливость крепи необходима в условиях неустановившейся нагрузки. Шарниры крепи обеспечивают ее сохранность и устойчивость при косо направленной нагрузке. Трапециевидная металлическая

крепь из рельсов или двутавровых балок, соединенных между собой уголками или литыми соединительными деталями, представляет собой полные или неполные крепежные рамы.

Штанговая (анкерная) крепь в шпурах, пробуренных в кровле и в боках выработки, выполняет функции «подвешивания» породных слоев или «сшивания» их в одну пачку. Применяют стальные, железобетонные, деревянные и полимерные штанги. Наиболее распространены стальные штанги, которые с помощью замка укрепляют в конце шпура, а на их концы навинчивают гайки. Применяют взрывоинъекционный способ анкерования.

Крепление вертикальных выработок при малом сроке службы производится деревянной крепью, представляющей собой венец из четырех бревен или брусьев. Венцы располагают вплотную друг к другу или на некотором расстоянии один от другого, поэтому различают сплошную, на стойках и подвесную крепь.

Армирование вертикальных выработок осуществляется установкой вандрутов, расстрелов, направляющих, лестничных полков и лестниц.

Вандруты устанавливают для усиления жесткости венцовой крепи попарно вдоль длинных сторон выработки, прикрепляют к венцам и соединяют между собой расстрелами. Расстрелы делят выработку на отделения. В подъемных отделениях на расстрелах устанавливают деревянные или металлические проводники, по которым движутся направляющие подъемных сосудов.

В лестничных отделениях через 3–4 м устраивают полки из досок, оставляя в них лазы размером 600 × 700 мм для передвижения людей. Лестницы шириной 400 мм устанавливают между полками под углом 80°. Лестничное отделение отшивают досками от подъемных.

Поддержание целиками — использование части рудного массива для перераспределения напряжений в процессе горных работ. Целики по мере доработки запасов извлекаются, но при малой ценности руд их оставляют. Поддержание целиками применяется как самостоятельный способ поддержания, так и в комбинации с креплением, закладкой пустот и магазинированием руды.

Целики подразделяют на охранные, междуэтажные, междублоковые и внутрикамерные. Охранные целики оставляют в недрах для защиты капитальных выработок. Выемка полезного ископаемого из охранных целиков разрешается только после того, как необходимость охраны миновала.

Междуэтажные целики состоят из потолочины камеры и днища вышележащего этажа. Междублоковые целики являются опорой. Внутрикамерные целики оставляют по мере необходимости.

При большой глубине разработки и в ряде других случаев оставление целиков становится опасным из-за возможности горных ударов. Поэтому возводят массивы из бетона или твердеющих смесей.

Поддержание магазинированной рудой — временное содержание руды в очистном пространстве для поддержания боковых пород. Поскольку руда при отбойке увеличивается в объеме, 30–40% выпускаются из блока по мере отбойки, а замагазинированная руда выпускается после погашения блока. Поддержание рудой осуществляется при разработке крутых и наклонных рудных тел в устойчивых породах. Способ неприменим при слеживающихся, возгорающихся и окисляющихся рудах.

Поддержание закладкой — заполнение технологических пустот пустой породой, хвостами обогащения, твердеющими смесями и т. п. По признаку заполнения выработанного пространства закладка может быть полной или частичной, а также комбинированной бутобетонной закладкой, т. е. совместной подачей в камеру породы и твердеющей смеси. По составу и способу транспортирования различают сухую, гидравлическую, твердеющую и пневматическую закладку.

В закладочный материал вводятся вяжущие вещества, в результате чего образуется массив высокой устойчивости и прочности. Расходы на добычу закладочного материала, его подготовку, транспортировку и размещение в очистных выработках в большинстве случаев

значительны, однако этот способ обеспечивает безопасность работ, радикальное снижение потерь полезного ископаемого, а также препятствует деформации перекрывающих пород и земной поверхности. После выемки полезного ископаемого горные выработки со временем или сразу заполняются породами, которые постепенно деформируются и обрушаются, вызывая оседание или разрушение земной поверхности.

Расходы на добычу, приготовление, транспортировку и размещение в очистных выработках закладочного материала достигают 2/3 себестоимости руды, однако этот способ обеспечивает безопасность работ, минимизацию потерь полезного ископаемого и гарантирует сохранность земной поверхности.

В заключительной стадии выемки запасов очистные выработки погашают или приводят в такое состояние, в котором они будут находиться в течение неопределенно долгого времени.

Транспорт и подъем

Подземный транспорт — комплекс сооружений и устройств, предназначенный для приема и перемещения грузов и людей. В его задачи входит транспортирование руды и породы от пунктов выгрузки из очистных блоков и проходческих забоев до перегрузочных комплексов, околоствольных дворов и рудничного подъема, снабжение добычных участков материалами, инструментом, оборудованием и перевозка людей.

Виды рудничного транспорта: рельсовый с использованием электровозов и вагонеток; самоходный на колесном ходу; конвейерный.

Наиболее распространен рельсовый транспорт. Локомотивный транспорт объединяет контактные электровозы, вагонетки с глухим днищем, боковой и донной разгрузкой, саморазгружающиеся сосуды. Работа локомотивов обеспечивается автоматизацией процессов откатки, включающей сигнализацию, централизацию и блокировку, дистанционное управление локомотивами и диспетчерскую службу.

Подъем и подземный транспорт — элементы единой транспортной системы. По типу оборудования рудничный подъем подразделяют на клетевой, скиповой, конвейерный, автомобильный, а по назначению — на главный и вспомогательный.

При значительной глубине разработки используют скиповой подъем руды, высокая производительность скипов объясняется их вместимостью (до 50 т), скоростью движения (до 20 м/с и более), тогда как клетки движутся со скоростью не более 8 м/с, и автоматизацией погрузочно-разгрузочных операций.

Конвейерный подъем эффективен при глубине горных работ до 400–600 м и производительности более 4–5 млн т/год, а также для подъема руды к комплексу загрузки скипов. Для использования конвейерного подъема необходимо дробление руды на куски размерами не более 0,1–0,15 м. Угол наклона выработки не должен превышать 16–18°.

Подъем руды на поверхность осуществляют автомобильным транспортом при углах наклона горных выработок до 11°.

Шахтный водоотлив

Главный рудничный водоотлив осуществляет откачку воды по трубам на поверхность, а участковый водоотлив — перекачку воды из отдельных участков шахты к водосборникам главного водоотлива. Схема водоотлива определяется схемой вскрытия, порядком разработки и гидрогеологией месторождения.

При значительной глубине применяют ступенчатый водоотлив, когда из нижних горизонтов вода перекачивается в промежуточные водосборники вышележащих горизонтов и затем на поверхность.

Система шахтного водоотлива объединяет водоотводные канавки, водосборники, насосные станции с водозаборными колодцами и водоотливными установками, с всасывающими и нагнетательными трубопроводами.

Для главного водоотлива применяют в основном центробежные многоступенчатые секционные насосы в горизонтальном исполнении, допускающие содержание механических примесей в воде крупностью 0,1–0,2 мм до 0,2%. Для подачи воды на поверхность в стволе шахты прокладываются рабочие и резервные трубы.

Рудничная вентиляция

Проветривание горных выработок осуществляется для создания в подземных выработках условий, исключающих вредное воздействие на человека ядовитых газов, высоких и низких температур.

Принцип проветривания горных выработок — создание сквозной вентиляционной струи за счет общешахтной депрессии и пропуска струи по выработкам. Используется нагнетательный, всасывающий или нагнетательно-всасывающий способ вентиляции. Воздух подают в шахту по одним выработкам, а отводят на поверхность по другим. Свежий воздух по выработкам распределяют с помощью автоматических вентиляционных дверей, шлюзов и перемычек.

Движение воздуха по горным выработкам обеспечивается вентиляторами главного и местного проветривания. Главные вентиляторные установки снабжаются системой дистанционного управления приводом вентилятора и контроля параметров работы с пульта главного диспетчера шахты и оборудуются системой реверсирования вентиляционной струи. При работе вентиляторов на нагнетание в зимнее время используется установка для подогрева воздуха природным газом, электричеством, паром или нагретой водой.

При прохождении вентиляционной струи по выработкам к рудничному воздуху примешиваются пыль, различные газы и т. п. Основная мера борьбы с примесями вредных газов — разжижение их свежим воздухом до предельно допустимых концентраций.

Для эффективного выноса пыли из забоя скорость воздуха должна быть не менее 0,3 м/с. Для борьбы с пылью применяют комплекс мер, среди которых приоритетно гидрообеспыливание.

Основные загрязнители при выбросах в атмосферу — газообразные и пылевые примеси в процессах буровзрывных работ, очистной выемки и др.

Обращение с пустыми породами

На земную поверхность извлекают не только полезное ископаемое, но и пустые породы, и некондиционную руду. Удельный расход выработок на 1000 т руды достигает: горно-подготовительных выработок 2–6 м³, нарезных 8–14 м³. Пустые породы выдают на поверхность и складировывают в отвалы.

Часть пустой породы с проходки горных выработок может использоваться в качестве сухой или бутобетонной закладки отработанных камер при системах разработки с закладкой выработанного пространства. Пустую породу также используют для производства заполнителя при изготовлении закладочной смеси на дробильно-сортировочных установках.

Руды, не отвечающие в настоящее время кондициям, и не используемые попутные полезные ископаемые укладываются в отдельные отвалы.

Хранение пород влияет на экосистемы окружающей среды. Масштабы и значение этих воздействий зависят от объемов горнодобывающей деятельности в сочетании с топографией и климатическими условиями района, особенностями залегания месторождения, технологии добычи, сельскохозяйственной деятельности в регионе и других факторов.

Источниками загрязнения атмосферы являются газопылевые выбросы с поверхности породных отвалов и рудных складов. Исходящий воздух содержит твердые частицы, окись углерода, оксиды азота и летучие органические соединения. Минимизация выбросов твердых частиц включает: использование туманообразователей, орошение горной массы, использование аэрозолей.

Обогащение бокситов

Бокситы представляют собой смесь гидраргиллита ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), диаспора и бемита (разновидности $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) с каолинитом, кварцем, минералами железа (лимонитом, гематитом, сидеритом, пиритом), титана (ильменитом, рутилом). Обогащение их позволяет улучшить показатели химического и металлургического переделов и за счет вовлечения в эксплуатацию некондиционных бокситов расширить сырьевую базу алюминиевой промышленности (Кузнецов В. П. и др.). Бокситовые концентраты, поступающие на производство глинозема и глиноземного цемента, должны содержать не менее 28–30% Al_2O_3 при отношении $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{SiO}_2 = 4 : 5,6$, а предназначенные для производства электрокорунда — не менее 49–52% Al_2O_3 при отношении $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{SiO}_2 = (6-15) : 1$.

Наиболее эффективным собирателем гидратированных оксидов алюминия является олеиновая кислота (0,4–0,6 кг/т). На практике часто пользуются ее смесью с талловым и машинным маслом (или керосином). Обязательные условия при флотации — снижение содержания растворимых солей (кальция, магния, железа, алюминия) и диспергирование пульпы. Для этой цели используют соду, едкий натр, сернистый натрий, фосфатные соединения (метафосфат, гексаметафосфат, пирофосфат натрия), жидкое стекло и крахмал, оказывающие одновременно и депрессирующее действие на минералы породы.

Предварительное введение в пульпу реагента ОП-7 способствует резкому уменьшению расхода собирателя и усиливает депрессию глинистых шламов. Оптимальное значение pH 7,5–9,5. Более высокие значения pH пульпы создаются при высоком содержании в руде каолинита.

При кондиционировании бокситов из них удаляют пиритную среду сульфгидрильными собирателями, органические примеси — аполярным собирателем, карбонаты железа — жирными кислотами. При обогащении бокситов возможно попутное получение ряда продуктов: каолинитового, железорудного, титанового, пиритного с промышленным содержанием в них металлов или элементов, т. е. комплексное использование сырья.

СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ

В зависимости от условий залегания рудных месторождений и мощности залежей разработка осуществляется открытым и подземным способами.

Открытая разработка применяется, если рудное месторождение залегает неглубоко. Подземный способ применяется в случае залегания руд на значительной глубине.

Преимущества открытого способа добычи:

- уровень комплексной механизации и автоматизации горных работ обеспечивает большую производительность труда и меньшие затраты на добычу полезного ископаемого;
- более безопасные и комфортные условия труда;
- более полное извлечение полезного ископаемого;
- меньшие удельные капитальные затраты на строительство.

Недостатки открытого способа:

- необходимость выемки значительно превышающих объем руды вскрышных пород, что составляет основную часть от общих затрат;
- необходимость изъятия из пользования значительных площадей земли и изменение ландшафта;
- изменение гидрологической ситуации в районе добычных работ.

При подземном способе разработки объемы перемещаемых пустых пород по сравнению с открытым способом незначительны и требуют меньших площадей для их размещения. Обеспечивается сохранность земной поверхности.

Согласно приведенным ниже таблицам, удельная интенсивность газовыделения на открытых горных работах в пересчете на 1 м³ скальной горной массы составляет $3,3 \cdot 10^{-2}$ м³/м³,

а на подземных — $1,05 \cdot 10^{-4}$ м³/м³ условной окиси углерода (более чем в 300 раз ниже). Причиной этого являются активные окислительные процессы, протекающие при взаимодействии продуктов детонации (СО, NO₂) с влагой, содержащейся в рудничном воздухе, как минимум в количестве 85–90%. В связи с локализацией продуктов детонации и термической диссоциацией воды, находящейся в подземных выработках, часть СО и часть NO₂ окисляются до своих высших окислов и затем поглощаются водой, т. е. переходят в слабые угольную и азотную кислоты. На открытых же горных разработках, в связи с мгновенным расширением взрывных газов и быстрым падением их температуры, активность окислительных процессов существенно ниже. Относительная влажность воздуха в карьерах всегда меньше, чем в шахтах, поэтому снижается количество окислителя (гидроксильные группы), поступающего в рудничный воздух за счет термической диссоциации воды. Около 50% продуктов взрыва выдаются вентиляторами и адсорбируются горной массой, а потому длительное время находятся в подземных выработках, создавая дополнительные благоприятные условия для их нейтрализации.

Таблица 4.7. Сравнительные характеристики по экологии открытых и подземных горных работ (газовый фактор)

Показатель	Удельная интенсивность газовой выделенности в атмосферу на открытых работах, м ³ /м ³	Удельная интенсивность газовой выделенности в атмосферу на подземных работах, м ³ /м ³
ИТОГО условное СО	$3,3 \cdot 10^{-2}$	$1,05 \cdot 10^{-4}$

Таблица 4.8. Сравнительные характеристики по экологии открытых и подземных горных работ (пылевой фактор)

Технологические процессы открытых горных разработок	Удельная интенсивность пылевыведения в атмосферу на открытых работах, г/м ³	Технологические процессы подземных рудников	Удельная интенсивность пылевыведения в атмосферу на подземных работах, г/м ³
Вскрышные работы и отвалообразование с применением роторно-конвейерных комплексов	0,0046–0,013	Бурение шпуров при проходке подземных выработок	0,0005
Узлы перегрузки горной массы на экскаваторе, конвейерах, отвалообразователе	0,00027–0,01	Взрывание шпуровых зарядов ВВ при проведении подземных выработок	0,0005
Отвалообразование с разгрузкой автосамосвалов	0,0066–0,3	Транспортировка пустых пород из проходческих забоев в отвалы	0,0003
Бурение взрывных скважин	356–110 370	Бурение взрывных скважин	0,0003
Выемочно-погрузочные работы по схеме «экскаватор — автосамосвал»	11,5–15,1	Массовые взрывы в очистных блоках	0,0006
Транспортировка горной массы автосамосвалами	586–980	Разгрузка скипов в приемные бункеры	12–15
Разгрузка автосамосвалов или железнодорожных вагонов в приемную воронку дробилки	25–30	Дробление, сортировка и складирование руды	13–15
Массовый взрыв	0,03–0,18	Погрузка руды в железнодорожные вагоны	30–35

В рудных шахтах и карьерах отмечены многочисленные случаи выделения природных газов, сероводорода, углекислого и сернистого газа. Причем если H_2S , SO_2 и CO_2 , учитывая их высокую растворимость, в шахтах практически полностью поглощаются водой и в атмосферный воздух не выбрасываются, то на карьерах они поступают в атмосферу. Обводненные выработки шахтной вентиляционной сети являются хорошими естественными фильтрами, поэтому и пылевые выбросы в атмосферу незначительны: удельная интенсивность пылевыведений в воздушный бассейн на открытых разработках достигает $111\ 695\ г/м^3$, а на подземных — до $66\ г/м^3$, т. е. на несколько порядков ниже благодаря коагуляции и налипанию рудничной пыли на мокрую поверхность подземных выработок и последующему смыву ее водой. Особенно активно протекают процессы коагуляции и смыва пыли с поверхности выработок в восстающих и вентиляционно-выдающих стволах.

Оценивая уровни звукового давления и вибрационной скорости технологического оборудования, следует отметить, что общий уровень заболеваемости горнорабочих тугоухостью и вибрационной болезнью на открытых горных работах существенно выше, чем на подземных.

Шум и вибрация

Уровни звука, дБА, и вибрационной скорости, дБ, практически при всех технологических процессах открытых и подземных горных работ, эксплуатации буровых и погрузочно-доставочных машин, хоть и незначительно, но превышают допустимые санитарные уровни. Фактические уровни вибрационной скорости локальной и общей вибрации при работе горных машин и механизмов на карьерах находятся в пределах 65–108 дБ, а на рудных шахтах — от 70 до 112 дБ, что превышает допустимые санитарные уровни виброскорости для отдельных активных полос вибрации.

Главной причиной этого является оборудование для открытых и подземных горных работ, неудовлетворяющее требованиям ГОСТ по уровням шума и вибрациям.

РОЛЬ ДОБЫЧИ АЛЮМИНИЕВОГО СЫРЬЯ В ГЛОБАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКЕ

Месторождения бокситов на земле распределены неравномерно, огромные ресурсы сосредоточены в тропических и субтропических областях.

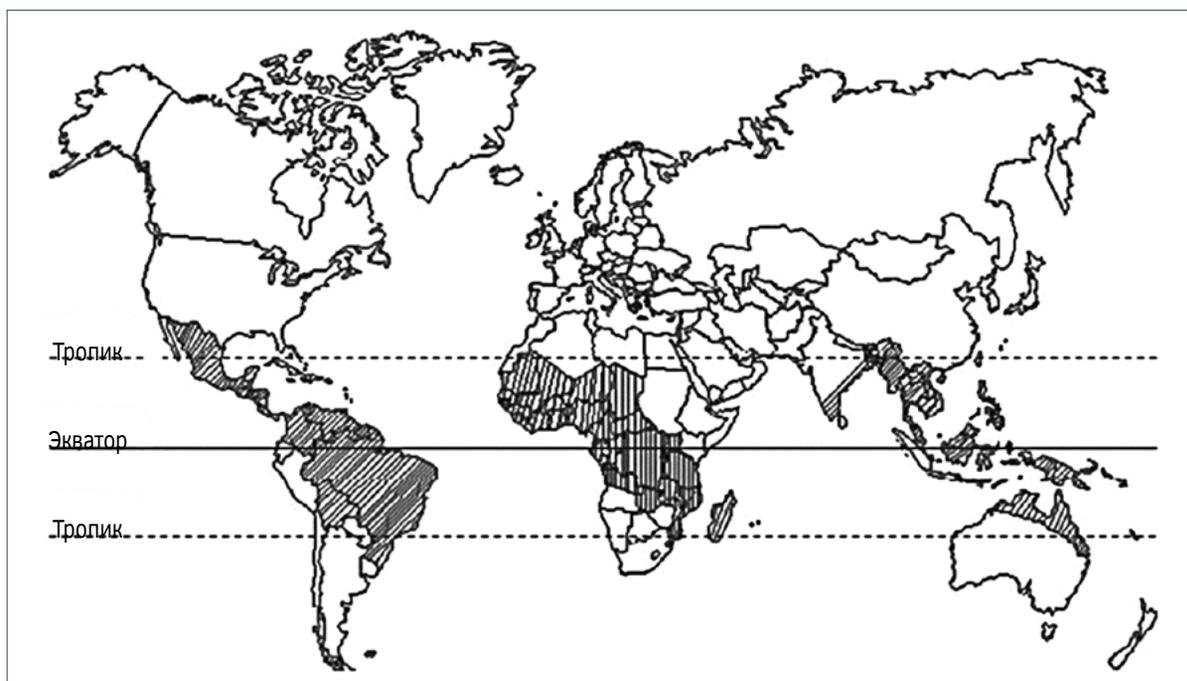


Рис. 4.5. Локализация месторождений бокситов

Наибольшее практическое значение имеют латеритные месторождения бокситов. Они образуются при глубоком химическом выветривании алюмосиликатных горных пород основного и среднего состава в результате интенсивной и длительной промывки пород дождевыми водами, которая приводит к выносу щелочных металлов и кремнезема и накоплению оксидов алюминия, железа и титана. Среди латеритных месторождений наибольшее промышленное значение имеют объекты бовального типа, широко распространенные в Гвинее, Индии, Бразилии.

Увеличение потребления алюминия влечет за собой увеличение производства бокситов. Республика Гвинея обладает крупнейшими запасами металла в мире.

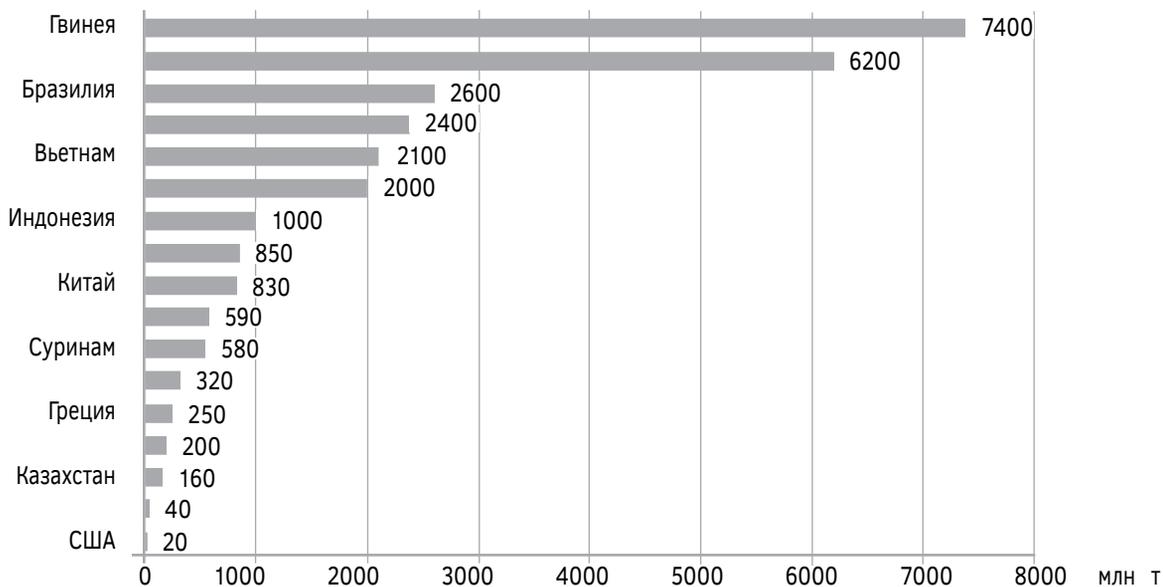


Рис. 4.6. Страны-лидеры по запасам алюминиевого сырья

В мире 98% бокситов добывается открытым способом. Крупнейшим мировым продуцентом бокситов является Австралия, на которую приходится треть мировой добычи.

Мировые лидеры по объему добычи бокситов в мире — Австралия, Китай, Бразилия, Гвинея. Согласно данным Всемирного банка, в 2018 г. Гвинея занимала уже четвертое место по добыче алюминиевого сырья. В ближайшей перспективе Гвинейская Республика может стать лидером по добыче в мире, так как на территории страны сосредоточены все крупнейшие запасы.



Рис. 4.7. Страны-лидеры по добыче алюминиевого сырья

Мировые запасы бокситов как основного сырья алюминиевой промышленности очень ограничены — в мире всего семь бокситоносных районов: Западная и Центральная Африка (основные залежи в Гвинее); Южная Америка (Бразилия, Венесуэла, Суринам); Карибский бассейн (Ямайка); Океания и Юг Азии (Австралия, Индия); Китай; Средиземноморье (Греция и Турция) и Урал (Россия).

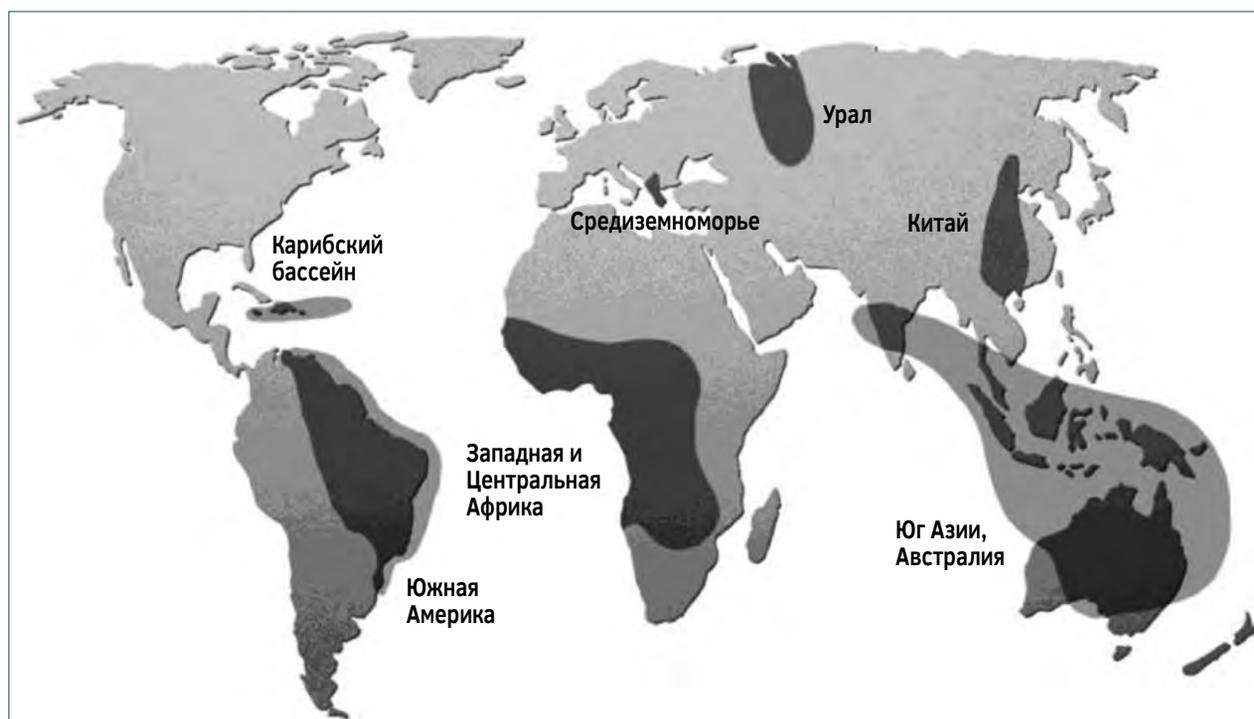


Рис. 4.8. Расположение бокситоносных запасов в мире

В развитых странах потребление бокситов увеличивается за счет роста автопрома, в развивающихся — за счет роста строительной и электротехнической отраслей, т. е. мировое потребление алюминия ежегодно растет на 5–6%. Производство первичного алюминия и добыча бокситов будут быстро расти. На протяжении последующих лет бокситы останутся самой важной базой для развития горнодобывающей промышленности Гвинеи, создания рабочих мест и социально-экономического развития страны.

На протяжении XXI века, с учетом темпов использования алюминиевого сырья в других странах, Гвинея станет основным источником производства бокситов.

С уверенностью можно сказать, что в ближайшее десятилетие Гвинея станет основным центром производства глинозема и алюминия, чтобы обеспечить мировую экономику одним из самых востребованных металлов.

ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ

Стратегия ресурсосбережения основана на положениях:

- некорректность технологий проявляется в потере природных ресурсов;
- деградация экосистем является следствием некорректности технологий, поэтому прибыль от реализации товарного продукта должна уменьшаться на величину компенсации ущерба окружающей среде.

Традиционные системы разработки не отвечают требованию полноты использования недр, поскольку исключают из сферы производства забалансовые запасы, составляющие большую часть месторождения. Выдача на земную поверхность для переработки всей

отделенной от массива отвечающей современным кондициям горной массы и оставление в недрах не отвечающих кондициям запасов являются недостатком традиционных технологий.

Технологии с твердеющими смесями являются эффективным средством управления массивом за счет контроля напряжений в массиве, но основаны на замещении объема выданных руд добываемыми на поверхности материалами, и для добычи компонентов твердеющих смесей снова разрушается верхний слой литосферы. Поэтому основным направлением совершенствования закладочных технологий является использование утилизируемого сырья.

Технологии с выщелачиванием металлов из руд позволяют извлекать до 50–70% металлов на месте залегания руд. При комбинировании этих технологий богатые руды выдают на поверхность и перерабатывают на заводе, остальные — перерабатывают в подземных блоках и в штабелях на поверхности. Побочными товарными продуктами комбинированной технологии являются металлы, строительное сырье, обессоленная вода, хлор, водород, кислород, кислоты и щелочи.

Конечной целью развития природоохранной концепции является безотходное горное производство с полной утилизацией хвостов первичной переработки добываемого сырья. Утилизация хвостов возможна после извлечения из них металлов до уровня санитарных требований. Такому требованию отвечает ряд новых технологий, например технология с воздействием в активаторах на минеральное сырье одновременно механической и химической энергией.

Для повышения экономической эффективности новые и традиционные технологии отработки балансовых и забалансовых запасов комбинируют на основе использования традиционной технологии и новых технологий подземного, кучного и механохимического выщелачивания в рамках единого процесса.

Одним из положительных результатов комбинирования является использование хвостов подземного выщелачивания, которые по окончании извлечения металлов на месте залегания естественными вяжущими веществами скрепляются в массив, прочность которого сравнима с прочностью твердеющих смесей.

Резервом экономики является вовлечение в производство некондиционных ресурсов путем использования технологий с выщелачиванием металлов, которые целесообразно комбинировать с традиционными технологиями разработки.

При оптимальном сочетании геологических, экономических и технологических факторов в повторную разработку месторождения вовлекаются металлосодержащие породы. Увеличение производственной мощности предприятий компенсирует увеличение затрат на разведочные мероприятия и, несмотря на существенное увеличение эксплуатационных затрат, способно обеспечить прибыль.

Доработка потерянных запасов становится экономически эффективной, когда технологии будут оценивать не только по извлеченному полезному компоненту, но и потерянному при добыче и переработке.

Оптимальное значение показателей комбинирования достигается, когда меньшая часть руды выдается на поверхность, а большая часть руды выщелачивается под землей. Сквозной коэффициент извлечения при комбинированной технологии сопоставим с извлечением при традиционной технологии, а минимизация затрат дает возможность получить прибыль.

Утилизируемые без ограничения по санитарным условиям продукты механохимической переработки формируют сырьевую базу не только для горного производства, но и для смежных отраслей хозяйства.

Утилизация хвостов обогащения на основе технологий выщелачивания обеспечивает возможности погашения пустот твердеющими смесями, что важно при работе на больших глубинах, в массивах со склонностью к динамическим перераспределениям горного давления и в других сложных условиях.

Экономический концепт новой технологии состоит в том, что при сравнимых затратах из уже разведанного, вскрытого, подготовленного и извлеченного из недр сырья добывается большее количество металла.

При выщелачивании в раствор извлекаются практически все содержащиеся в хвостах металлы.

Положительным эффектом комбинирования является исключение необходимости хранения хвостов переработки с минимизацией ущерба окружающей среде.

Экономика горного производства может быть улучшена созданием смежных производств товарной продукции из хвостов выщелачивания руд и хвостов обогащения после извлечения металлов до уровня санитарных норм.

Металлические месторождения включают балансовые и забалансовые запасы. Перестройка производства на добычу выщелачиванием только забалансовых запасов не всегда возможна, поэтому реальное вовлечение забалансовых запасов в производство обеспечивается при комбинировании традиционной и новой технологий.

В первой стадии комбинированной разработки примерно треть балансовой руды извлекается одним из вариантов традиционной системы с созданием компенсационного пространства для отбойки оставшихся балансовых и забалансовых запасов руды.

Во второй стадии балансовые и забалансовые запасы совместно отбивают на открытые камеры первой стадии, что усредняет содержание металлов в руде и улучшает условия выщелачивания.

За счет роста масштабов производства возможно снижение себестоимости продукции.

Основными показателями управления качеством руды в рудопотоках являются бортовое содержание полезного компонента в руде, при котором производится оконтуривание запасов, и минимальное промышленное содержание полезного компонента.

Большая часть перерабатывающих предприятий недостаточно загружена местным сырьем. Если на базовых рудниках увеличить производство концентратов, то за счет улучшения использования мощностей рудников, фабрик, заводов и транспортных средств возможен экономический эффект.

Конверсия горных предприятий на новые технологии и комплексное использование ресурсов в 2–3 раза эффективнее по сравнению со строительством новых предприятий из-за использования имеющихся производственных фондов, запасов и инфраструктуры.

Эффект от применения комбинированной технологии может быть определен как сумма эффектов у производителя руд и концентратов у их потребителя по сравнению с базовым вариантом.

Концепция технологической конверсии горного производства включает:

- повышение качества руд при технологиях с твердеющими смесями;
- максимальное использование недр при переработке некондиционных руд;
- полное извлечение ценных компонентов при заводской переработке.

Вовлечение в переработку источников химизации экосистем окружающей среды решает одновременно две проблемы глобального значения: упрочнение минерально-сырьевой базы горных предприятий и сохранение от деградации региона функционирования горного производства.

Оценивать перспективы совместного развития минеральной базы горной промышленности и тенденций природосбережения следует из того, что спрос на продукцию горного производства удовлетворять будет еще труднее, несмотря на вовлечение в эксплуатацию новых месторождений. Будут осваиваться глубокие горизонты действующих рудников, месторождения со сложными горно-геологическими условиями, бедные руды, что сопряжено со снижением содержания металла в добываемых рудах, увеличением объема отходов и усилением нагрузки на окружающую среду.

К настоящему времени накоплены организационные, технические и технологические решения, которые позволяют применять в широких масштабах комбинированные технологии

на основе традиционного (ТС) способа переработки руд с использованием методов подземного (ПВ) и кучного (КВ) выщелачивания полезных компонентов (ПК).

Традиционная технология добычи (ТС)

Преимущества:

- 1) незначительные потери ПК из балансовых запасов (5–10%);
- 2) достаточно точный контроль за движением запасов в процессе добычи;
- 3) широкие возможности маневрирования процессами добычи.

Недостатки:

- 1) высокие трудоемкость и себестоимость добычи, транспортирования и переработки руды;
- 2) значительное разубоживание руды (до 30%) и, как следствие, повышение себестоимости конечного продукта на ГМЗ;
- 3) сильное загрязнение окружающей среды.

Кучное выщелачивание (КВ)

Преимущества:

- 1) возможность извлечения ПК из хвостов рудообогатительных фабрик (РОФ);
- 2) возможность прямого контроля гранулометрического и вещественного состава выщелачиваемой руды;
- 3) широкая возможность механизации и автоматизации производства.

Недостатки:

- 1) дополнительные трудовые и материальные затраты на выдачу руды из недр и формирование штабеля;
- 2) необходимость в земельных отводах под строительство штабелей КВ;
- 3) загрязнение окружающей среды.

Подземное выщелачивание (ПВ)

Преимущества:

- 1) в сравнении с традиционной технологией добычи более низкие трудоемкость и себестоимость;
- 2) широкая возможность автоматизации и роботизации производства;
- 3) высвобождение перерабатывающих мощностей гидromеталлургических заводов (ГМЗ);
- 4) социально более благоприятные условия труда;
- 5) малое загрязнение окружающей среды.

Недостатки:

- 1) сравнительно низкое извлечение ПК из руды (коэффициент извлечения 0,6–0,8);
- 2) сложность прямого контроля за движением запасов в процессе выщелачивания;
- 3) уеобходимое строительство цехов по переработке растворов;
- 4) готребность значительных рудных площадей для обеспечения заданной производительности рудника.

Основную часть балансовых запасов месторождений предпочтительно извлекать методами физико-технической геотехнологии, а при необходимости с переработкой рудной массы — на обогатительных фабриках.

Большой интерес представляют так называемые ярусные горнотехнические системы отработки месторождений. Ярус — участок месторождения, в пределах нижней и верхней отметки вскрываемый и подготавливаемый определенным способом: открытым, подземным, открыто-подземным, скважинным, а также их сочетанием.

Типовые горнотехнические системы комбинированной физико-технической и физико-химической геотехнологии включают следующие сочетания физико-технических способов добычи: открытый, подземный, открыто-подземный, выбуривание керна скважиной большого диаметра, гидродобыча и физико-химические методы — кучное выщелачивание на поверхности, в карьере и в подземных камерах, а также подземное и скважинное выщелачивание ценных компонентов из рудного массива с возможностью их выдачи в продуктивном растворе для последующей гидрометаллургической переработки или с осаждением на других рудах с целью их обогащения на месте залегания для добычи физико-техническими способами и выдачи в потоке рудной массы для пирометаллургического передела.

Одноярусные горнотехнические схемы предполагают возможность развития горных работ в пределах одного яруса — открытого или подземного. При этом реализуются сочетания этих базовых способов добычи с кучным выщелачиванием в карьере в подземных камерах второй очереди или в зоне обрушения, с подземным выщелачиванием бедных либо мало-мощных прибортовых рудных залежей, со специальной технологией добычи богатых руд выбуриванием скважин большого диаметра, либо гидродобычей.

Применение двухъярусной горнотехнической системы возможно при совмещенной отработке месторождения открытым и подземным способами. При отработке карьера параллельно создается искусственная потолочина подземным способом. При доработке карьера в его основании формируется штабель из отходов горного производства или перемещение некондиционных руд из отвалов предприятия. В искусственном массиве формируются прудки с гидроизоляцией под продуктивные растворы. На борту карьера устанавливаются емкости для подачи растворов на штабель. По мере насыщения продуктивные растворы подаются на комплекс переработки, находящийся на промплощадке рудника. Нижележащие запасы отрабатываются традиционно подземным способом или с применением технологий кучного выщелачивания в камерах второй очереди. По мере их отработки в очистном пространстве остаются отходы выщелачивания, которые выполняют роль закладки. Днище камер оборудуют скважинами для сбора продуктивных растворов. Подача растворов в камеру осуществляется через сеть скважин, пройденных из подземных горных выработок вентиляционно-закладочного горизонта.

В четырехъярусной горнотехнической системе отработка запасов мощного месторождения с большой глубиной распространения ведется карьером, открыто-подземным ярусом, подземным способом системами разработки с твердеющей закладкой. Доработка выклинивающихся вниз запасов осуществляется с нижнего подземного горизонта с использованием системы откачных и закачных скважин. По закачным скважинам в рудный массив подается растворитель, а по откачным с помощью насосов выдается продуктивный раствор.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Голик, В. И. Специальные способы разработки месторождений / В. И. Голик. — М. : ИНФРА-М, 2014. — 132 с.
2. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2016 и 2017 годах» / Минприроды России. — М., 2018. — 372 с.
3. Ильин, С. А., Открытый способ разработки месторождений: возможности и пути совершенствования / С. А. Ильин, В. С. Коваленко, Д. В. Пастихин // Горный журнал. — 2012. — № 2.
4. ИТС-37 Добыча и обогащение угля : информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. — М. : Бюро НДТ, 2017. — 294 с.
5. Ломоносов, Г. Г. Производственные процессы подземной разработки рудных месторождений / Г. Г. Ломоносов. — М. : Горная книга, 2013. — 522 с.

6. Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья. Международная конференция (2016; Санкт-Петербург), 26–30 сент. 2016 г. [материалы] / ред. кол.: В. А. Чантурия, Т. В. Чекушина. — М. : Руда и мет., 2016. — 645 с.
7. Трубецкой, К. Н. Горное дело. Терминологический словарь / К. Н. Трубецкой ; под науч. ред. К. Н. Трубецкого, Д. Р. Каплунова. — 5-е изд., перераб. и доп. — М. : Горная книга, 2016. — 635 с.
8. Чантурия, В. А. Современное состояние и основные направления развития технологии комплексной переработки минерального сырья цветных металлов / В. А. Чантурия, В. А. Бочаров // Цветные металлы. — 2016. — № 11. — С. 11–18.
9. Черных, А. Д. Открыто-подземная разработка рудных месторождений / А. Д. Черных, Б. Н. Андреев. — Киев : Техника, 2010. — 574 с.
10. Шубов, Л. Я. Флотационные реагенты в процессах обогащения минерального сырья : справочник : в 2 кн. / Л. Я. Шубов, С. И. Иванков, Н. К. Щеглова / под ред. Л. В. Кондратьевой. — М. : Недра, 1980. — Кн. 2. — 263 с.
11. Экономические проблемы и механизмы развития минерально-сырьевого комплекса (российский и мировой опыт). Международная научная конференция (2015; Санкт-Петербург), 2–3 дек. 2015 г. [сб. научных трудов]. — СПб. : Нац. минерал.-сырьев. ун-т «Горный», 2016. — 380 с.
12. 1Statistical Review of World Energy — all data, 1965–2017 // BP p. l.c. [Official web-site]. — 2018. — URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/xlsx/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-all-data.xlsx> (accessed: 04.01.2019). — Screen heading.

ДОБЫЧА И ОБОГАЩЕНИЕ ДРАГОЦЕННЫХ МЕТАЛЛОВ

Борис Борисович Ковалев

МГУ им. М. В. Ломоносова, старший научный сотрудник,
кандидат физико-математических наук

Константин Эдуардович Дубровин

Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики»,
инженер

ВВЕДЕНИЕ

К драгоценным металлам относятся золото, серебро, платина и металлы платиновой группы (палладий, иридий, родий, рутений и осмий). В мировом масштабе доля добычи драгоценных металлов составляет порядка 0,00005% вследствие небольшого содержания в земной коре (10^{-5} – 10^{-8} %).

Добыча драгоценных металлов — это извлечение драгоценных металлов из коренных (рудных), россыпных и техногенных месторождений с получением концентратов и других полупродуктов, содержащих драгоценные металлы.

Содержание золота в земной коре очень низкое — $4,3 \cdot 10^{-10}$ % по массе. Месторождения золота отличаются по физико-химическим условиям образования, а также по геологическим условиям их локализации в горных породах. Большая часть золоторудных месторождений мира образовалась в результате гидротермальных процессов. Главными спутниками самородного золота в этих месторождениях являются кварц (оксид кремния SiO_2) и сернистые соединения тяжелых металлов (сульфиды железа, свинца, цинка и меди). По минеральному составу гидротермальные месторождения золота разделяют на золото-кварцевые (рудных минералов меньше 1,5%) и золото-сульфидно-кварцевые (рудных минералов 1,5–20,0%).

Экономическое значение имеют месторождения золота малых глубин. Особенно широко месторождения этого типа распространены в молодых складчатых областях. Вмещающими породами служат мезозойские песчаники, аргиллиты и конгломераты, а размах оруденения по глубине колеблется от 50 до 400 м. Рудные жилы близ поверхностных месторождений отличаются большим минеральным разнообразием. Золото всегда распределено в рудах неравномерно. На фоне рассеянного оруденения с содержанием золота 2–3 г/т наблюдаются обогащенные участки (рудные столбы, бонанцы), в которых содержание золота достигает нескольких сот граммов на тонну. Протяженность рудных столбов колеблется в широких пределах — от 30 до 400 м по простиранию (по длине) и от 50 до 700 м по падению (по глубине).

Другим важным типом эндогенных месторождений золота являются эксгальционно-осадочные медно-колчеданные и свинцово-цинковые руды. Этот тип руд проявляет связь с базальтоидным магматизмом и резко отличается по степени накопления сернистых соединений тяжелых металлов (Fe, Pb, Zn, Cu) и кремнезема. В рудах встречается самородное золото двух типов. Первый тип — тонкодисперсное невидимое золото в виде мельчайших включений в сульфидах железа (пирите FeS_2 и арсенопирите FeAsS), которое плохо поддается извлечению, и видимое золото в окисленных рудах в виде пластинок, проволочек, дендритов и даже самородков в железных, свинцовых и висмутовых охрах и карбонатах меди (малахите). Содержание золота в колчеданных рудах низкое (менее 3 г/т).

Попутная добыча золота вместе с другими цветными металлами осуществляется и из сульфидных медно-никелевых руд магматического генезиса.

При разрушении первичных эндогенных месторождений золото накапливается с образованием вторичных экзогенных месторождений. Существуют два типа экзогенных месторождений золота: зоны окисления золотосодержащих сульфидных месторождений и россыпи. Золотые россыпи различаются по способу их образования. Аллювиальные и делювиальные россыпи образуются на горных склонах вблизи коренного источника, аллювиальные россыпи связаны с переносом материала речными потоками, известны также морские, ледниковые и золовые россыпи. Наиболее богатые россыпи находят на стыке долин, прорезающих вмещающие их горные породы.

Среди коренных месторождений золота особое место занимают метаморфизованные руды. Этот тип месторождений образуется в результате переработки древних (протерозойских) россыпей, которые в результате геологических процессов погружаются на значительную глубину и захораниваются под более молодыми (палеозойскими, мезозойскими) осадочными породами.

Среднее содержание серебра в земной коре, по А. П. Виноградову, $7 \cdot 10^{-6}\%$. В природе серебро встречается в самородном (металлическом) состоянии или в соединениях с другими элементами в минералах, но преимущественно как примесь в золото-серебряных, медных и свинцово-цинковых рудах, из которых добывается 70–80% всего серебра. Главнейшие минералы серебра: самородное серебро Ag (обычно содержит механическую примесь Hg, Au, Cu, Bi, Sb); аргентит Ag_2S (81,1% Ag); прустит Ag_3AsS_3 (65,4% Ag); пираргирит Ag_3SbS_3 (65,3% Ag); стефанит Ag_5SbS_4 (68,5% Ag); полибазит (Ag, Cu) $16Sb_2S_{11}$ (62,1–84,9% Ag); кераргирит AgCl (75,3% Ag).

Все месторождения серебра являются гидротермальными. Среди них выделяются следующие типы (формации): серебряносодержащие свинцово-цинковые и медные; золото-серебряные; собственно серебряные; оловянно-серебряные.

Серебросодержащие свинцово-цинковые и медные месторождения являются основным источником серебра. К ним относятся скарновые и гидротермальные месторождения свинцово-цинковых, медных, колчеданно-полиметаллических и медно-колчеданных руд. Содержание серебра в свинцово-цинковых месторождениях изменяется от 10 до 1000 г/т и более, колчеданно-полиметаллических — от 100 до 350 г/т, медно-порфировых — от 0,5 до 85 г/т, медистых песчаниках и сланцах — от 1 до 250 г/т. Повышенные содержания серебра связаны с блеклыми рудами (до 1800 г/т и более) и галенитами (от 500 до 7000 г/т).

Золото-серебряные и серебряные месторождения размещаются главным образом в пределах Тихоокеанского рудного пояса, а также в азиатской и карпатской ветвях Средиземноморского пояса.

Оловянно-серебряные месторождения получили развитие во внешней зоне Тихоокеанского пояса, реже они встречаются в активизированных участках (наложенных впадинах) его внутренней зоны. Они залегают среди вулканических пород субвулканических массивов.

Металлы платиновой группы (МПГ) относятся к числу редких. Содержания МПГ в земной коре лишь немного превышают кларк для золота и на два порядка ниже, чем кларки таких редких металлов, как Ta, W, Mo. В хондритах содержание МПГ значительно выше, чем в земной коре, что может указывать на концентрацию этих металлов в глубинных оболочках Земли. Среди магматических пород наиболее богаты платиновыми металлами оруденелые породы ультраосновного и основного состава, с которыми связаны главные типы месторождений МПГ. Так, в хромитовых рудах, связанных с ультраосновными породами офиолитовых поясов, концентрируются преимущественно Ru, Ir и Os, в концентрически-зональных

ультрабазитовых массивах уральского типа — преимущественно Pt, в сульфидных медно-никелевых рудах — Pd и Pt. Для россыпных месторождений наибольшее значение имеют соединения Pt и Fe, среди которых чаще всего встречается изоферроплатина Pt₃Fe. Менее важны в промышленном отношении металлические фазы Os-Ir-Ru (рутениридосмины), самородные Os и Ir. В коренных хромитовых рудах часто присутствуют сульфиды Ru и Os: лаурит RuS₂ и эрлихманит OsS₂. В сульфидах Cu-Ni и малосульфидных платинометалльных рудах минералы МПГ очень разнообразны. В них выявлены многочисленные соединения металлов платиновой группы с S, As, Se, Sn, Sb, Te, Hg, Pb и Bi. Важнейшими источниками металлов платиновой группы являются два типа месторождений: платинометалльные малосульфидные и комплексные сульфидные Cu-Ni. Резко подчиненное значение имеют платиновые россыпи, а также колчеданно-полиметаллические, медно-порфиновые и другие месторождения, из руд которых МПГ извлекаются попутно.

Платинометалльные малосульфидные месторождения приурочены к крупным расслоенным массивам, в нижних частях которых преобладают ультраосновные породы, сменяющиеся вверх по разрезу расслоенными габброидами. Сумма МПГ в таких месторождениях составляет примерно 15–22 г/т.

Месторождения платиносодержащих Ni-Cu руд связаны с телами основного и ультраосновного состава, располагаясь в нижней их части. Платиновые металлы входят в состав руд как в виде самостоятельных соединений, так и в виде изоморфных примесей в главных сульфидах, преимущественно в пентландите (Fe,Ni)₉S₈. Самыми богатыми Pd, Pt, Au и Ag являются массивные кубанитовые, талнахитовые и моихукитовые типы руд с вариациями средних содержаний Pt — 3,4–24,2 г/т, Pd — 20,9–101,8 г/т, причем Pd всегда преобладает над Pt.

Платиновые россыпи являются традиционным источником МПГ. Коренными рудоносными породами платиновых минералов аллювиальных россыпей являются, концентрически-зональные массивы ультраосновных и основных пород. По набору главных минералов принято выделять рутениридосминовый, рутенплатосмиридовый, иридисто-платиновый, иридосминовый и платиновый типы россыпей. Определенным резервом для получения МПГ являются трудноизвлекаемые или недостаточно технологически исследованные руды колчеданно-полиметаллических и медно-порфиновых месторождений.

Хромитовые месторождения, связанные с телами ультраосновных пород, в настоящее время не представляют промышленного интереса в отношении МПГ и могут считаться лишь перспективными объектами. В таких месторождениях содержания Ru, Os и Ir превышают Pt, Pd, Rh. Наиболее обычные минералы МПГ в них — сплавы Ru, Os и Ir, лаурит, ирарсит, илатарсит. Суммарное среднее содержание МПГ в хромитовых рудах достаточно высокое: 0,355 г/т, но низкая извлекаемость платиновых металлов при переработке хромитовых руд не позволяет относить их к сырьевым источникам этих элементов.

Платиноносность углеродистых (черносланцевых) толщ установлена в последние десятилетия во многих регионах мира. Типовым объектом черносланцевых месторождений являются комплексные платиноидно-полиметалльные руды в альбит-карбонатно-слюдистых метасоматитах. Содержание Pd в рудах варьирует от 0,5–1,5 до 150–400 г/т, Pt — от 0,05–0,1 до 25–30 г/т, иногда присутствуют Ir (0,005–1 г/т), Rh (до 0,6 г/т) и Os (до 0,2 г/т).

Драгоценные металлы могут находиться в любом состоянии (виде), в том числе в самородном и аффинированном, а также в сырье, сплавах, полуфабрикатах, промышленных продуктах, химических соединениях, ювелирных и других изделиях, монетах, ломе, отходах производства и потребления.

ПРЕДПРИЯТИЯ РОССИИ ПО ДОБЫЧЕ ДРАГОЦЕННЫХ МЕТАЛЛОВ

Предприятия по добыче золота

В структуре запасов России основную роль играют месторождения золото-кварцевых, золото-сульфидных и золото-мышьяково-сульфидных руд, локализованных в углеродсодержащих терригенных и терригенно-карбонатных отложениях, а также золото-серебряные месторождения вулканоплутонических поясов, отличающиеся более богатыми, чем в зарубежных аналогах, рудами. На долю коренных золоторудных месторождений приходится более 65% российских запасов драгоценного металла.

В Российской Федерации запасами и прогнозными ресурсами обладают 39 субъектов, которые в основном сосредоточены в пяти федеральных округах страны: Дальневосточном, Сибирском, Уральском, Приволжском и Северо-Западном. Наибольшее значение имеют два региона: Дальневосточный и Сибирский округа, на долю которых приходится наибольшее число запасов золота. В 28 субъектах Российской Федерации разведано более 200 коренных месторождений золота и 140 комплексных, концентрирующих в себе соответственно 54 и 28% от общих запасов золота России; около 5000 россыпных месторождений содержат 18% запасов. На учет в Государственном балансе запасов полезных ископаемых Российской Федерации поставлены запасы золота категорий А+В+С₁, 22 коренных и 63 россыпных месторождений, составившие 130,1 т. В том числе 16 золоторудных и 6 комплексных объектов, суммарные запасы категории С₁ которых составили 122,1 т, категории С₂ — 377,4 т.

Около 25% коренных месторождений представлено мелкими объектами. Основные же запасы сосредоточены на медно-колчеданных и медно-никелевых месторождениях Урала и Норильского горно-промышленного района.

По запасам золоторудного сырья среди субъектов РФ лидируют: Красноярский край (20,6%), Магаданская область (12,44%), Республика Саха (9,71%), Хабаровский край (9,12%), Иркутская область (8,4%). Преобладающая часть запасов рудного золота (около 60%) сконцентрирована в крупных и весьма крупных месторождениях, таких как Сухой Лог, Нежданинское, Гайское, Наталкинское, Куранахское, Олимпиадинское и др. (рис. 5.1).

Наиболее крупным по добыче золота предприятием является ПАО «Полюс», которое добывает около 22,8% от всего объема золота, добываемого в России. ОАО «Полиметалл» находится на втором месте по добыче и занимает 9,4% рынка. Предприятия «KinrossGold» и ОАО «ГК «Южуралзолото» занимают 7,9 и 5,5% всего рынка (табл. 5.1).

Таблица 5.1. Золотодобывающие предприятия России

№ на карте	Регион	Недропользователь, месторождение	Геолого-промышленный тип
1	Оренбургская область	Гайское	Медно-колчеданный
		Васин	Золото-сульфидно-кварцевый
2	Челябинская область	Светлинское	Золото-сульфидный
		Кочкарское	Золото-сульфидно-кварцевый
3	Свердловская область	Березовское	Золото-сульфидно-кварцевый
		Воронцовское	Золото-сульфидный

№ на карте	Регион	Недропользователь, месторождение	Геолого-промышленный тип		
4	Красноярский край	Олимпиадинское	Золото-мышьяково-сульфидный		
		Ведугинское			
		Титимухта			
				Попутнинское	Золото-сульфидно-кварцевый
				Благодатное	Золото-сульфидный
				Панимба	Золото-кварцевый
		Эльдорадо			
5	Иркутская область	Вернинское	Золото-сульфидный		
		Чертово Корыто			
		Сухой Лог			
7	Забайкальский край	Ключевское	Золото-сульфидно-кварцевый		
		Итакинское			
		Дарасунское			
				Талатуйское	Кварцевый
				Тасеевское	Золото-серебряный
				Балейское	
		Серебряное			
8	Республика Саха (Якутия)	Нежданнинское	Золото-мышьяково-сульфидный		
		Кючус			
		Куранахская группа	Коры выветривания		
		Река Большой Куранах	Древняя россыпь		
		Гросс	Золото-кварцевый		
11	Хабаровский край	Албазинское	Золото-серебряный		
		Многовершинное			
		Хаканджинское			
9	Чукотский АО	Песчанка	Медно-порфировый		
		Майское	Золото-мышьяково-сульфидный		
		Купол	Золото-серебряный		
		Двойное			
		Кекура	Золото-кварцевый		
Каральвеемское					
10	Амурская область	Бамское	Золото-серебряный		
		Пионер			
		Маломырское	Золото-сульфидно-кварцевый		
		Березитовое			
11	Хабаровский край	Албазинское	Золото-серебряный		
		Многовершинное			
		Хаканджинское			
12	Магаданская область	Наталкинское	Золото-кварцевый		
		Павлик	Золото-серебряный		
		Перекатное			
13	Камчатский край	Аметистовое	Золото-серебряный		
		Бараньевское			
		Агинское			
		Родниковое			

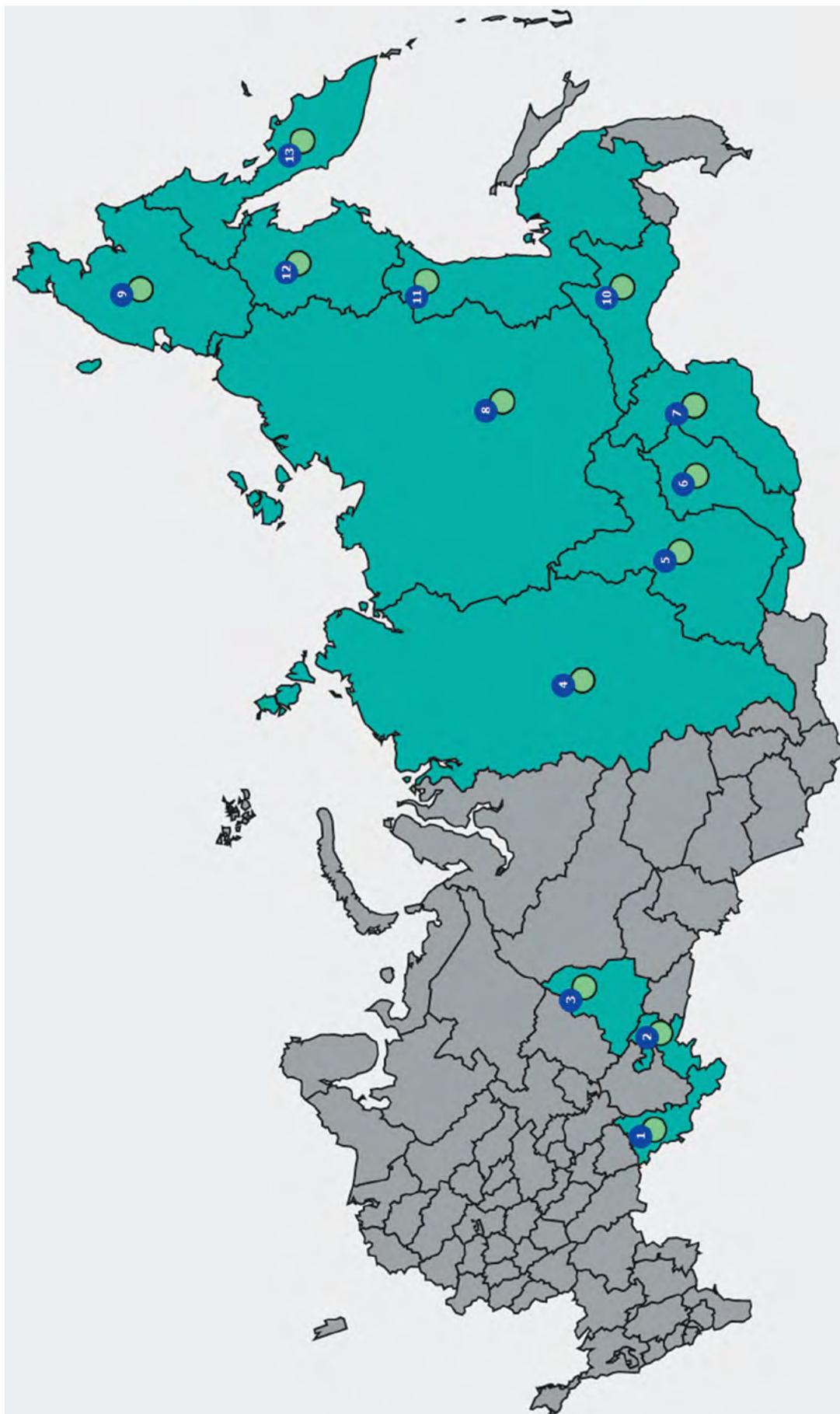


Рис. 5.1. Карта-схема расположения месторождений золота Российской Федерации:

1 — Оренбургская область; 2 — Челябинская область; 3 — Республика Саха (Якутия); 4 — Краснодарская область; 5 — Красноярский край; 6 — Иркутская область; 7 — Забайкальский край; 8 — Чукотский АО; 9 — Республика Саха (Якутия); 10 — Амурская область; 11 — Хабаровский край; 12 — Камчатский край; 13 — Магаданская область.

Предприятия по добыче серебра

Российская Федерация обладает значительной сырьевой базой серебра, заключающей около 7% его мировых ресурсов и насчитывающей 123 тыс. т запасов категорий А + В + С₁ + С₂, почти половина из которых разведана по категориям А + В + С₁. Запасы категорий А + В + С₁, заключенные в вовлеченных в освоение объектах (без учета Холоднинского месторождения), составляют 44,6 тыс. т, что обеспечивает стране четвертое место в мире по размеру сырьевой базы серебра после Перу, Мексики и Польши. Россия обладает высоким потенциалом наращивания запасов серебра — только наиболее достоверные ресурсы категории Р₁ оценены в количестве 36 тыс. т. Качество руд российских месторождений с запасами серебра в целом соответствует мировым аналогам.

В рудах комплексных месторождений цветных и драгоценных металлов, где оно присутствует в качестве попутного компонента, содержание серебра изменяется от 0,2 до 770 г/т, а в колчеданно-полиметаллических — от 9 до 536 г/т.

Подавляющая часть российской сырьевой базы серебра находится в восточных регионах страны, в том числе почти 60% запасов сосредоточено в недрах Забайкальского и Красноярского края, Республики Саха (Якутия) и Магаданской области (рис. 5.2). В Забайкальском крае серебро заключено в комплексных месторождениях, основными компонентами которых являются медь, свинец, цинк, олово, золото и другие металлы.

Ведущим производителем серебра является крупный холдинг АО «Полиметалл», обеспечивающий около половины добычи серебра в России и входящий в десятку крупнейших мировых производителей. Остальные значимые производители серебра добывают его попутно. Крупнейшими среди них являются крупные российские компании-производители цветных металлов и золота. Так, около 17% добычи приходится на предприятия холдинга ОАО «Уральская горно-металлургическая компания».

Крупным производителем серебра также выступает ПАО «ГМК «Норильский никель», добывая попутно на сульфидных медно-никелевых объектах Красноярского края (и в небольшом количестве в Мурманской области) 5% металла (табл. 5.2).

Таблица 5.2. Серебродобывающие предприятия России

№ на карте	Регион	Недропользователь, месторождение	Геолого-промышленный тип
1	Оренбургская область	Гайское	Медно-колчеданный
2	Республика Башкортостан	Подольское Ново-Учалинское	Медно-колчеданный
3	Челябинская область	Узелгинское	Медно-колчеданный
4	Алтайский край	Корбалихинское	Колчеданно-полиметаллический
5	Красноярский край	Октябрьское	Сульфидный медно-никелевый
		Талнахское	Колчеданно-полиметаллический
		Горевское	
6	Республика Бурятия	Озерное	Колчеданно-полиметаллический
		Холоднинское	
7	Забайкальский край	Удоканское	Медистые песчаники
		Нойон-Тологой	Скарново-полиметаллический
8	Республика Саха (Якутия)	Прогн оз	Серебряный
		Верхне-Менкече	
		Вертикальное	
9	Чукотский АО	Нежданнинское	Золото-мышьяково-сульфидный
		Купол (Чукотский АО)	Золото-серебряный
		Песчанка (Чукотский АО)	Медно-порфировый
10	Хабаровский край	Хаканджинское	Серебряно-золотой
11	Магаданская область	Дукатское	Золото-серебряный
		Лунное	Серебряно-золотой
		Гольцовое	Серебряный

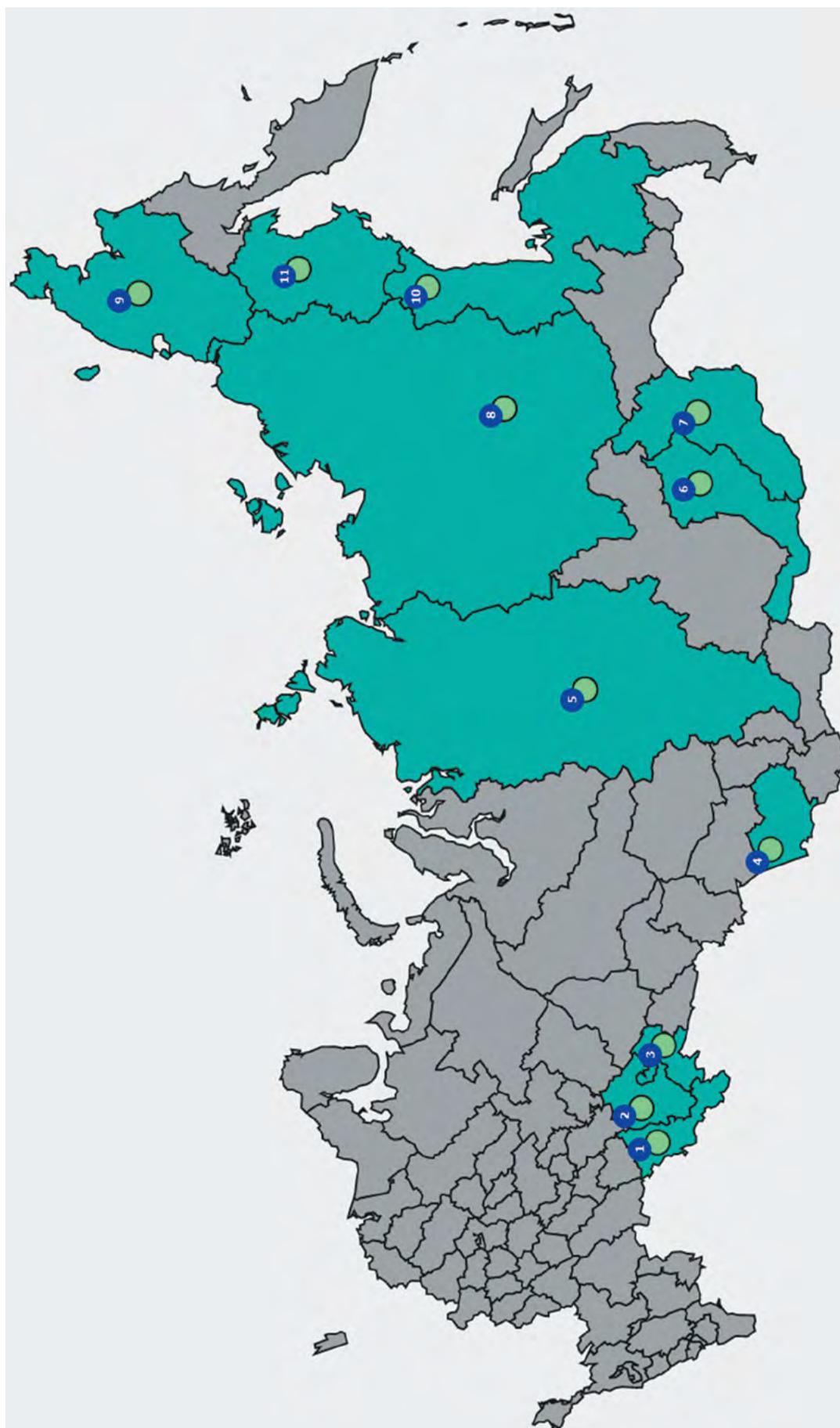


Рис. 5.2. Карта-схема расположения месторождений серебра Российской Федерации:

1 — Оренбургская область; 2 — Республика Башкортостан; 3 — Челябинская область; 4 — Алтайский край; 5 — Красноярский край; 6 — Республика Бурятия; 7 — Забайкальский край; 8 — Республика Саха (Якутия); 9 — Чукотский АО; 10 — Хабаровский край; 11 — Магаданская область

Предприятия по добыче платины

Минерально-сырьевая база металлов платиновой группы (МПГ) Российской Федерации составляет 15 тыс. т. Промышленные запасы эксплуатируемых и осваиваемых месторождений в России достигают 4 тыс. т, РФ прочно занимает вторую позицию в мире. Металлы платиновой группы заключены в рудах комплексных сульфидных медно-никелевых месторождений и извлекаются попутно при добыче никеля и меди.

В российских недрах заключена примерно пятая часть мировой сырьевой базы МПГ. Запасы только разрабатываемых и осваиваемых месторождений категорий А + В + С₁ достигают 8,4 тыс. т платиноидов, а запасы страны в целом составляют 15,4 тыс. т, что позволяет России уверенно занимать вторую позицию в мире по количеству заключенных в недрах платиноидов после ЮАР. Прогнозные ресурсы наиболее достоверной категории Р₁ составляют 33,9 т.

Распределение месторождений МПГ на территории России крайне неравномерно — более 95% запасов платиноидов сосредоточено в Красноярском крае (рис. 5.3). Все выявленные здесь месторождения относятся к сульфидному медно-никелевому типу. Центром платиноидной промышленности страны является Норильский рудный район Норильско-Хараелахской металлогенической зоны, где эксплуатируются два крупнейших объекта, которые уникальны как по масштабу, так и по качеству руд: Октябрьское и Талнахское месторождения, не имеющие сопоставимых аналогов ни в России, ни в мире. В Норильском рудном районе разведаны еще три аналогичных месторождения меньшего масштаба: Норильск-1, Масловское и Черногорское. Основными недропользователями являются ПАО «ГМК «Норильский никель», АО «Артель старателей «Амур» и ООО «Черногорская ГРК» (табл. 5.3).

Таблица 5.3. Предприятия России по добыче платиноидов

№ на карте	Регион	Недропользователь, месторождение	Геолого-промышленный тип
1	Красноярский край	Октябрьское	Сульфидный медно-никелевый
		Талнахское	
		Масловское	
		Норильск-1	
		Черногорское	
2	Хабаровский край	Река Кондер	Россыпной
		Река Уоргалан, нижнее течение	

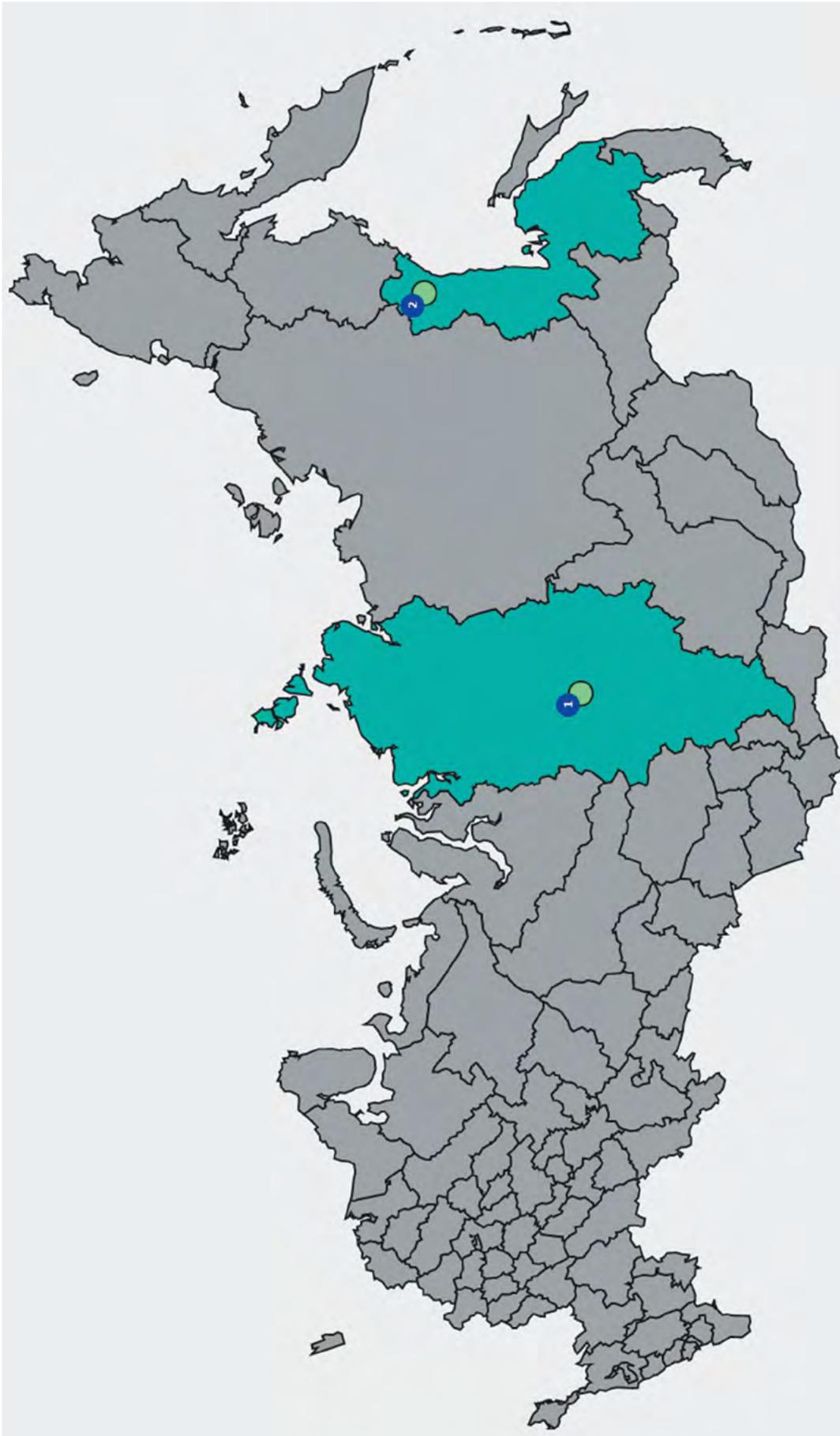


Рис. 5.3. Карта-схема расположения месторождений платины Российской Федерации:

1 — Красноярский край; 2 — Хабаровский край

ИСТОРИЯ ЗАРОЖДЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ПО ДОБЫЧЕ ДРАГОЦЕННЫХ МЕТАЛЛОВ

История зарождения золотодобывающей промышленности

Зарождение золотодобывающей промышленности в мире

Историю добычи золота исследователи ведут с медно-каменного века, основной объем добычи приходился на Древний Египет. Аравийско-Нубийская территория севера Африки была первой золотоносной провинцией Земли.

Первыми освоенными человеком золотоносными месторождениями были россыпные. Золотые самородки находили в массе аллювиальных песков и гравия, представлявших собой продукты разрушения горных золотоносных пород.

Древнейшим способом обработки золотоносной породы являлась промывка песка и гравия в проточной воде, уносившей легкие материалы, а тяжелые частицы оставались на промывочном лотке.

Рудное золото добывают из жил в породах, где ему сопутствуют минералы свинца, цинка и железа.

Способ подземной добычи жильного золота на египетских рудниках известен со II в. до н. э. Для дробления горной породы применялись огонь, вода и деревянные клинья. Около разрабатываемого участка породы разводили костер, породу нагревали, а затем быстро охлаждали водой. В образовавшиеся трещины вбивали деревянные клинья, которые, разбухая, раскалывали горную породу. Обломки рудной породы снова нагревали в пламени костра, охлаждали и дробили.

За счет жестокой эксплуатации рабов и бедного населения в Древнем Египте добывалось огромное количество золота, сравнимое с современной добычей. Есть исторические данные о том, что при фараоне Тутмосе III, правившем Египтом приблизительно в 1479–1425 гг. до н. э., добыча золота временами превышала 40 т в год. В Древнем Египте существовали рудники, разработка которых, судя по записям на папирусах и надписям на камнях, длилась тысячелетия. Более тысячи лет существовали рудники Вади-Абасса и Акита, на которых горные работы были начаты между 1317 и 1251 гг. до н. э. Хаммаматские рудники упоминались еще в период 3000–2000 гг. до н. э. До нашего времени на папирусе дошла первая карта золоторудного месторождения — «Гора золота» в Вади-Хаммамат. Датируется этот папирус 1250–1313 гг. до н. э. Карта показывает геологическую изученность крупного месторождения, на котором отдельные объекты отработаны, другие — находятся в эксплуатации, а третьи — разведаны и ждут своей очереди.

Железный век (1200–50 гг. до н. э.) завершил великую золотую эпопею Египта. В эти годы Египет постоянно подвергался нашествиям многочисленных завоевателей: ливийцы, эфиопы, Ассирия, Персия постоянно опустошали Египет. Последний недолгий расцвет золотой страны состоялся при династии Птолемеев, унаследовавших Египет от империи А. Македонского. За весь железный век в Верхнеегипетском районе было добыто около 400 т золота, в Нубийском — 500 т, в Эфиопии — 50 т. Торговля и набеги в страны Южной Африки принесли в казну фараонов еще 340 т золота.

Добыча золота в железном веке оценена в 4120 т, из них 600 т добыто в Иберии (современные территории Испании и Португалии), 500 т — в Галлии (современная Франция), 500 т — на Балканах, в Индии, Бактрии и Согдиане (Узбекистан и Таджикистан) — более 400 т.

К этому времени золотые запасы Аравийско-Нубийской провинции истощились — за последовавшие годы Римской империи (50 г. до н. э. — 500 г. н. э.) в Египте было добыто всего 30 т золота, в Нубии — 50 т, Эфиопии — 110 т. В современной истории в Египте с 1902 по 1958 г. было добыто еще около 230 т.

Всего египтяне ко времени захвата Римом добыли около 6000 т золота. С территории Африканского континента до этого времени извлечено 4185 т золота, из которых только Египет и Нубия (Судан, Эфиопия) дали 1710 и 1600 т соответственно.

Золотоносная провинция Пиренейского полуострова (Иберия) во времена Римской империи оказалась одной из крупнейших в мире. В провинциях Астурии, Галисии и Лузитании были организованы арругии — золотодобывающие горные предприятия, на которых работали десятки тысяч рабов. На испанских и португальских месторождениях содержание золота в горных породах было невысоким. Для получения большого количества металла необходимо было переработать огромные объемы горной массы. Новый способ заключался в том, что сначала в золотоносной породе проделывались тоннели, в которых ставились подпорки и перемычки. После того как подпорки убирались, горная порода под своей массой обрушивалась и дробилась. Раздробленную золотоносную породу тщательно промывали водой из искусственно созданных водоемов.

На исходе первого столетия нашей эры один сообразительный ученый пришел к выводу, что процедуру извлечения золота можно упростить. Его заключение было таково: золото очищается ртутью. Необходимо только смочить (смешать) ртутью тонко измельченную руду (шлих), слить образующуюся при этом жидкую амальгаму, а затем раскалить ее, вновь отделить ртуть от золота, дав ей испариться. Описание добычи золота с помощью его амальгамирования в долине реки Синд (Инд) составил Бируни (XI в.), среднеазиатский ученый-энциклопедист.

На римских арругиях было добыто в общей сложности 500 млн т золотоносной руды и получено 1500 т золота. Золото Древнего Рима было не только в предметах для украшения, из него делались и монеты. Рядом с основным храмом Рима находилась мастерская по производству золотых монет. Храм имел название — Юнона Монета, откуда и пошло название металлических денег. Римляне были вынуждены производить монеты из золота, ведь этому способствовали некоторые факторы:

- большое количество золота, которое было изъято в Галлии;
- нужно было содержать армию страны, которая была очень многочисленная, где оплатой служило золото Рима в виде изготовленных монет.

Вторая после Иберии область золотодобычи Рима — Балканы. Основные работы были сосредоточены в Македонии и Фракии (ныне Болгария). Во Фракии добывалось до 36 т золота в год. Еще в железном веке здесь было добыто 500 т драгоценного металла, в период Римской империи — 350 т. Провинция Дакия (Румыния) дала Риму 190 т золота. Галлия (Франция) дала римлянам всего 50 т (следует отметить, что в железном веке здесь добыто 500 т), также 50 т было добыто в Чешском (Богемском) массиве. Вне римского мира наиболее значительной была добыча в Индии и Средней Азии.

Покорив кельтские племена Центральной Европы, Юлий Цезарь заполнил золотом лоно алчущего Рима. Римская империя уподобилась огромной печи, в которой плавилось золото Древнего мира.

После падения Римской империи начался застой (500 лет) не только в области добычи золота, но и во всех областях горного дела с V по IX в.

В Европе с X в. главной золотой кладовой считалась Чехия. В XI в. одним из центров добычи стала Словакия в составе Венгерского королевства, где ежегодно добывалась 1 т золота, т. е. почти половина всей мировой добычи тех лет. В позднем Средневековье главным источником добычи золота стала Тропическая Африка. Португальцы и другие европейцы спускались в поисках драгоценного металла все далее на юг вдоль западного побережья Африки. Золотой Берег (ныне Гана) произвел 266 т золота, Судан (ранее Нубия) — 124 т. В Азии Китай добыл 229 т, Индия — 145 т золота. На юге Индии сохранились значительные по площади участки, где велись древние горные работы. Среди месторождений этой страны крупнейшим является Коларское, из которого за период отработки добыто (по разным источникам) от 520 до 715 т золота.

В общей сложности с 500 до 1494 г. в Европе добыто 570 т, в Азии — 903 т, в Африке — 838 т, в Америке — 169 т. Общая мировая добыча Средневековья оценивается учеными в 2480 т золота.

После открытия Колумбом в 1492 г. Нового Света добыча золота существенно активизировалась. Был открыт целый ряд месторождений в Южной Америке.

В 1700 г. золото начали добывать в Бразилии. В считанные годы страна превратилась в основного мирового поставщика драгоценного металла, добывая его до 15 тыс. т в год. Золотоискатели хлынули в Бразилию, и это повлияло на освоение нового континента.

Первую роль в мировой золотодобыче стали играть Колумбия, которая до 1900 г. добыла 1381 т золота, и Бразилия — 1085 т. Но в целом в 1800 г. среднегодовая добыча не превышала 20,2 т.

Серьезный подъем мировой золотодобычи начинается с 1848 г. с открытием золотых россыпей в Калифорнии (США). Это стало одним из факторов, способствовавших созданию Соединенных Штатов Америки. В 1850 г. открытие золотых месторождений в Австралии вызвало поток поселенцев на новые территории, в 1885-м — интенсивная разработка золотоносных конгломератов в ЮАР (Витватерсранд), с 1880 г. осваиваются месторождения Аляски. Самая знаменитая золотая лихорадка началась в 1896 г., когда два канадских геолога обнаружили запасы металла неподалеку от реки Юкон. Аналогичная история произошла десятилетием позже в Южной Африке, с одним лишь различием: там золото добывалось уже корпорациями и промышленным способом.

В XVI в. люди суммарно добывали около 763 т этого драгоценного металла, в XVII — около 914 т, в XVIII — 18 900 т, а в XIX — уже более 11 616 т.

С середины XIX в. весомый вклад в мировую золотодобычу вносит Российская империя.

В 30-х гг. XIX в. англичанином В. Петерику и венгром Г. Тучнаку изобретены поршневые отсадочные машины с неподвижным решетом, которые носили название «гарцевские». Гидравлические отсадочные машины получили распространение в России с конца 50-х гг. XIX в.

Новое время дало миру 16 030 т золота, а общая накопленная золотодобыча к 1900 г. составила 28 800 т, из которых в Европе добыто 5172 т, в Азии — 6102 т, в Африке — 6400 т, в Америке — 7806 т, в Австралии и Океании — 3320 т.

Зарождение золотодобывающей промышленности в России

Золото на территории современной России начали добывать еще за 2500 лет до н. э. На Кавказе, Урале, Алтае, в Западной Сибири были обнаружены следы древних работ: горные выработки рудников, отвалы, остатки промывочных устройств. Иван III выписывал из Италии рудознатцев, Иван Грозный начал завоевывать Сибирь, при Алексее Михайловиче казаки до Колымы добрались, но золота не находили. Огромные усилия прилагал Петр I, в 1700 г. он образовал специальное министерство: Приказ рудокопных дел (в дальнейшем — Берг-коллегия, с 1807 г. — Горный департамент). Приглашали знатных заморских специалистов, Петр I объявил «горную свободу», разрешив искать золото везде, невзирая на принадлежность земли.

Первое «домашнее» золото нового времени было получено в Забайкалье на Нерчинских рудниках в 1714 г., Иван Мокеев научился извлекать золото из серебряной руды. Считается, что одними из первых его стали добывать Демидовы — с 1726 г. Примерно в это же время велись работы на алтайских рудниках и чуть позже — в Карелии. С 1729 г. по мокеевскому способу желтый металл начали производить на алтайских серебряных рудниках. Количество добытого золота было ничтожным: с 1719 по 1799 г. таким способом получили с огромными трудностями химического разделения всего 830 кг золота. Со временем из полиметаллических руд в России стали извлекать до 400 кг золота в год, но этот способ слыл очень дорогим.

Первым в России районом, где удалось найти коренное рудное золото, стал Урал: знаменитое Березовское месторождение было открыто крестьянином Ерофеем Марковым в 1745 г. В 1747 г. начал работать первый отечественный золотой рудник, названный впоследствии Первоначальным. За весь XVIII в. в России было добыто лишь 22,6 т золота.

Первое промышленное россыпное золото в 1803 г. обнаружил по берегу реки Чусовой крестьянин деревни Кургановой Андрей Крылатков. Содержание драгоценного металла доходило до 1 кг на кубометр. Открытый на реке Чусовой прииск в честь первооткрывателя назван Крылатовским и разрабатывается по сей день.

Настоящий прорыв в развитии россыпной золотодобычи в России произошел в 1814 г. Лев Брусницин обнаружил свободное золото с содержанием более 400 г на кубометр по берегам речек Пышма и Бертзовка в песчано-глинистом слое и предложил простую технологию его извлечения. До Брусницина считалось, что золото можно извлечь только с предварительным измельчением пород. Промывка песков оказалась таким простым и доступным делом, что ее начали применять повсеместно. С 1814 по 1867 г. только на Урале было добыто около 607 т золота. В 20-х гг. XIX в. на Урале началась настоящая золотая лихорадка. Открытия месторождений россыпного золота в Сибири и на Дальнем Востоке последовали одно за другим: в Забайкалье (1830 г.), на Енисейском кряже (1839 г.), в Баргузинской тайге (1845 г.), Бодайбо (1864 г.), Приморье (1869 г.), в низовьях Амура (1890 г.). Открытие Енисейского месторождения вывело Россию на некоторое время на первое место в мире по добыче золота. В 1831–1840 гг. она дала более трети мировой добычи и сохраняла лидерство до конца 40-х гг. XIX в.

К концу этого века Россия добывала в год около 40 т золота, из них 93% — россыпного. Всего же в России до 1917 г. по официальным данным было добыто 2888 т золота, по неофициальным оценкам — 3500–3700 т: объемы нелегальной добычи и контрабандного вывоза золота за 1830–1920 гг. в Китай и Японию достигали 30–40% от отчетных данных.

Максимум золотодобычи в Российской империи пришелся на 1914 г. — 61,7 т. Войны и революция привели к резкому спаду добычи золота. Так, если в 1917 г. было добыто 28 т, то в 1921 г. — менее 1 т.

В 1933 г. 66,8% общесоюзной добычи золота обеспечили старатели. После открытия в Восточной Сибири больших запасов золота в бассейне реки Алдан в Якутии и на Колыме объемы золотодобычи пошли в гору.

Важной вехой развития золотодобычи стало освоение Колымы, которая с 1932 по 1956 г. дала стране 1187 т драгоценного металла.

После восстановления разрушенного войной хозяйства СССР планомерно наращивал производство драгоценного металла, максимум которого пришелся на 1989 г. — 304 т.

Всего в СССР за 1918–1991 гг. было добыто 12 048 т золота (14,8% от всей мировой добычи). США за это же время добыли всего 5772 т.

С крушением Советского Союза золотодобыча в новой России начала приходить в упадок: со 180 т в 1990 г. она снизилась до 113,5 т в 1998 г. Благодаря принятым мерам организационного порядка и в связи с постоянным ростом цен на золото (с 2001 по 2012 г. они увеличились более чем в 6 раз) золотодобыча начала расти быстрыми темпами и в 2012 г. достигла 217,8 т, а всего с 1992 г. в РФ добыто 3287,1 т золота. Всего же на территории нашей державы с 1719 по 2013 г. добыто более 18,2 тыс. т драгоценного металла. Среднегодовые объемы добычи золота в СССР и России приведены на рис. 5.4.

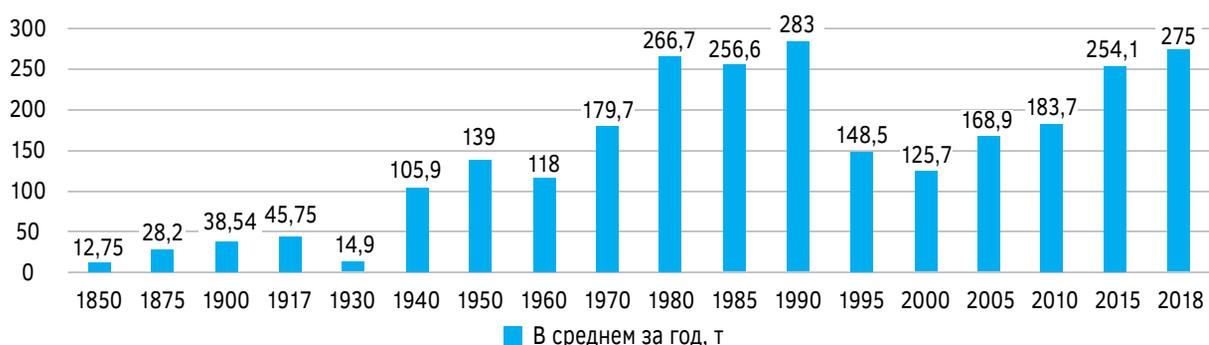


Рис. 5.4. Объемы добычи золота в СССР и России

История зарождения серебродобывающей промышленности

Зарождение серебродобывающей промышленности в мире

Серебро известно человечеству с древнейших времен, встречалось оно в самородном виде. Одним из древнейших центров добычи и обработки серебра была доисторическая Сардиния, где оно было известно с раннего неолита. До середины II тысячелетия до н. э. серебро ценилось дороже золота. Одним из самых первых месторождений серебра считают Сирию.

С 360 г. до н. э. к западу от г. Эльязыга на реке Евфрат (Турция) были древние рудники на месторождении Кебанманден, где жилы галенита, содержащего серебро, приурочены к контакту жил порфира и метаморфических пород. Из добытого здесь серебра чеканились монеты.

Более или менее значительные данные о добыче серебра относятся к периоду после III тысячелетия до н. э. Известно, что племена халдеев, живущие на берегу Персидского залива, вдоль нижнего течения Тигра и Евфрата, извлекали металл из свинцово-серебряных руд.

В VI–V вв. до н. э. центр добычи серебра переместился в Лаврийские рудники в Греции. Известно, что эти шахты были весьма богаты: их добыча с 600 до 300 г. до н. э. составляла около 1 млн тр. унций в год. И в течение почти тысячи лет они оставались самым крупным источником серебра в мире. О масштабах работ свидетельствуют сохранившиеся в районе Лавриона остатки 2000 шахт и горизонтальные горные выработки общей протяженностью более 150 км.

С IV по середину I в. до н. э. в производстве серебра лидировали Испания и Карфаген. В III в. до н. э. между Карфагеном и Римом разгорелось жестокое соперничество за преобладание в Западном Присредиземноморье. После победы над Карфагеном римляне овладели в Испании лишь небольшой полосой в южной и восточной прибрежных ее частях, но там и находились серебряные рудники. Лишь в начале нашей эры римляне завладели всей Испанией. Захватив ее лучшие месторождения, они не только отработали уже известные с фантастической по тем временам глубиной (до 1500 м), но и открыли много новых. Шахты Испании в течение ряда столетий служили важным поставщиком серебра, после завоевания страны маврами в VIII в. их разработка была временно остановлена. Этот факт вынудил Европу искать новые источники металла в других странах, главным образом в центральной части континента. Между 750 и 1200 гг. были открыты крупные месторождения, заработали шахты в Центральной и Восточной Европе.

Но все-таки в I тысячелетии Испания доминировала по производству серебра, а в Греции и Малой Азии наблюдался спад. Ощутимый рост производства произошел с 1000 по 1500 г.: выросло число новых месторождений, постепенно улучшались методы добычи и производства металла. Во II–XIII вв. в Европе действовало много рудников. В XV–XVI вв. основным производителем становятся Рудные горы.

Открытие Америки в конце XV в. стало в истории серебра важнейшей вехой. Начало эксплуатации месторождений Нового Света в пользу Испании положила добыча металла в Боливии, затем в Мексике, Перу. В период с 1500 по 1800 г. в Мексике было произведено около 1,5 млрд тр. унций металла, причем основная масса приходится на период в 100 лет — с 1700 по 1800 г. В Перу добывалось в среднем 3 млн унций ежегодно. Город Потоси (Боливия) на обширном высокогорном плато в Андах вырос у подножия гигантской горы, которая практически вся оказалась сложена из серебра: в 1565 г. извлечено металла на 177 тыс. серебряных песо, в 1578 г. — 530 тыс. песо, в 1582 г. — 860 тыс. песо.

В целом именно серебро, а не золото Америки (основным центром добычи которого стала Колумбия и особенно район Буритика, эксплуатируемый индейцами с незапамятных времен) питало финансовую мощь испанской короны. Так, с 1503 по 1650 г. на Пиренеи из Нового Света доставлено 300 т золота и 45 тыс. т серебра. С 1650 по 1800 г. — еще 50 тыс. т серебра.

Крупнейшим из старых месторождений самородного серебра является открытое в 1623 г. месторождение Конгсберг в Норвегии.

С 1500 по 1800 г. Боливия, Перу и Мексика производили 85% мирового серебра. Остальные 15% поступали главным образом из Германии, Венгрии и России, и совсем немного — из Чили и Японии. Впервые мокрое толчение было применено в г. Яхимове (Чехия) Паулем Громменететтором в 1519 г., а в 1521 г. здесь была построена первая толченая фабрика; в 1519 г. им же изобретена отсадка на решетках.

Одновременно развивались промышленные технологии, в частности, метод ртутного амальгамирования. Новые источники и технологии позволили увеличить производство серебра почти на порядок. Так, в течение 20 лет с 1850 по 1870 г. производство серебра в мире составляло 40–80 млн унций ежегодно.

Во второй половине XIX в. на рынок серебра выходят другие страны. Значительная часть металла поступала с новых месторождений США в Неваде, Колорадо, Юте.

В последнюю четверть XIX в. производство серебра выросло в четыре раза по сравнению со средними показателями первых 75 лет столетия, составив 120 млн унций ежегодно. В 1876–1920 гг. достигнуты новые рубежи как в технологическом производстве, так и в количестве новых месторождений по всему миру. Практически одновременно были открыты новые запасы в Австралии, Центральной Америке, Европе, Японии. Мировая добыча растет. Первые 20 лет нового столетия дают рост производства металла еще на 50%, достигается рекордный уровень в 190 млн унций ежегодно. До конца XIX в. серебро наряду с золотом активно использовалось в системе денежного обращения разных стран. И лишь на рубеже веков серебро уступило место золоту, переключившись в сферу производства. Помимо удешевления технологии добычи серебра и открытия новых месторождений этому способствовал переход наиболее мощных в экономическом отношении стран (США, Германия, Италия) на золотую валюту, т. е. введение золотого стандарта, что привело к вытеснению серебра из внутреннего денежного обращения и закреплению золота в качестве доминирующей формы мировых денег.

XX в. был отмечен дальнейшим прогрессом в области горных технологий, новых методов отделения серебра от простых металлов (цинка, свинца, меди и т. д.), что повысило возможности добычи, позволило перерабатывать большие объемы руд, содержащих серебро, в том числе с умеренным и малым содержанием металла.

Приведем несколько цифр, связанных с запасами и добычей серебра в мире на конец XX в. Свыше 50% мировых запасов этого металла в рудах сосредоточено в Северной Америке, 12% — в Африке, 6% — в Австралии, 3% — в Южной Америке. По данным Горного бюро США, на 436 основных месторождениях мира содержится свыше 250 тыс. т серебра. При этом значительная его часть (почти 90 тыс. т) содержится на месторождениях свинцово-цинковых руд, 43,6 тыс. т — в собственно серебряных рудах, 49,8 тыс. т — в медных, 3,8 тыс. т — в золотых рудах. Что касается добычи, то в 2000 г. первые пять мест по объемам занимали: Мексика (2840 т), Перу (2520 т), Австралия (2130 т), США (2040 т), Китай (1550 т).

Поддерживает спрос развитие солнечной энергетики, прежде всего, в Китае. Так, в 2017 г. мировой спрос на серебро со стороны гелиоэнергетики вырос на 20% до 92 млн унций, или 9,4% от объема совокупного спроса на металл. При этом 74% мирового объема производства солнечных панелей приходится на Китай. В 2017 г. рост производства солнечных панелей в Китае оценивается в 27% (до 71,4 МВт), а установка солнечных панелей — в 50%, что связано со стимулирующим государственным регулированием в данной сфере.

Спрос на серебро покоится на трех китах: промышленном и декоративном потреблении, кинофотопромышленности и ювелирной промышленности. На них приходится более 95% ежегодного спроса на металл. Причем последние две составляющие поглощают примерно 2/3 мирового потребления серебра (примерно по 200 млн унций).

Зарождение серебродобывающей промышленности в России

В XV в. энергичные поиски серебряных месторождений начинаются в России. В 1488 г. русский царь Иван III обратился к венгерскому королю Матиашу I и к другим правителям с просьбой прислать мастеров горнорудного дела. В 1491 г. из Москвы на Печору была отправлена первая экспедиция рудознатцев, которая нашла «руды серебряную и медяную на реке Цымле» (Цильме). В 1584 г. в Москве был создан государев Приказ каменных дел — первое в России государственное управление по разведке и разработке недр. В 1600 г. издано «Горное Узаконение», призывавшее «сыскивать золотых и серебряных, медных и иных руд». В 1676 г. получено первые известия о рудных месторождениях Нерчинского округа. А в 1681 г. найдены серебряные руды по рекам Шилке и Аргуни и подобрано место для строительства завода по переработке этих руд. В 1696 г. найдено месторождение серебряной руды на р. Каштак на Северо-Восточном Алтае. Образцы этой руды были отправлены для исследования за границу, где подтвердилось ее высокое качество.

Особая роль в создании и развитии серебряного дела России принадлежит Петру I. Именно он в августе 1700 г. учредил в Москве государственный орган, ведающий вопросами горного производства, — Приказ рудокопных дел. И в ноябре того же года он издает указ «О прииске золотых, серебряных, медных и иных руд по всему пространству России; об осмотре Воеводам приискных руд на месте, и о награждении учинивших таковой прииск частных лиц». 1701 г. и 1704 г. — важнейшие «серебряные» годы для России. В 1701 г. впервые в Москву присланы пять золотников (21,3 г) нерчинского серебра, полученного при опытной плавке. В 1704 г. пущен первый в России Нерчинский сереброплавильный завод, а в столице началась чеканка первых в истории страны монет из «домашнего» серебра.

Целый ряд серебряных месторождений был открыт в XVIII в. В 1717 г. найдены богатые запасы серебра на Алтае, в 1726 г. Акинфий Демидов получил разрешение правительства добывать здесь медные, серебряные и золотые руды, началась разработка алтайских серебро-содержащих месторождений полиметаллических (медно-свинцово-цинковых) руд, которые значительно превосходили по всем показателям нерчинские. В 1728 г. найдено серебро в Печорском крае. В 1732 г. рудоискателями отцом и сыном Костылевыми открыто Змеиногорское полиметаллическое месторождение. В 1735 г. уральский штейгер Демидова Ф. Е. Лелеснов установил наличие в этих рудах серебра. В 1736 г. здесь построили Змеиногорский (ранее Змеевский) рудник, который с 1747 г. был передан в частную собственность императорской фамилии. Несколько позднее недалеко от Змеиногорского рудника открыто Николаевское месторождение серебряных руд. В 1746 г. на Петербургском монетном дворе начато систематическое разделение и очистка (аффинаж) металла Колывано-Воскресенских заводов Алтая, а также золотистого серебра Нерчинского завода. И.А. Шлаттер разработал комбинированную схему аффинажа золотистого серебра сухим и мокрым способами. В 1750 г. Колывано-Воскресенские заводы произвели 3 т серебра, а с 70-х гг. XVIII в. они стали ежегодно давать около 16 т этого металла. Государство стало обеспечивать себя «домашним» серебром. В этот период развиваются технологии и техника добычи металла. Так, в 1764 г. инженер К. Фролов на Корбалихинском сереброплавильном заводе (Алтай) осуществил механизацию транспортировки, дробления и промывки руды. В 1767 г. изобретатель-металлург Ф. Бакунин разработал и внедрил плавку серебряных руд с применением шлаков в качестве флюсов.

В XIX в. добыча российского серебра увеличивалась. Не ослабевало и благорасположение властей к поиску драгоценных металлов. В 1812 г. был издан указ «О предоставлении права всем российским подданным отыскивать и разрабатывать золотые и серебряные руды с платежом в казну подати». Это первый русский закон, специально посвященный добыче золота и серебра. В 1849 г. основан Акузенский полиметаллический рудник недалеко от г. Баян-Аула и в том же районе пущен Александровский свинцово-серебро-медный завод. В 1886 г. заработал Козьмо-Демьяновский серебро-свинцово-медный завод под г. Каркаралинском, а в 1889 г. промышленник А. И. Деров построил опытный серебро-свинцовый завод в 90 км от оз. Балхаш.

Двадцатый век в России, как и во всем мире, отмечен многочисленными достижениями прогресса в горнорудном деле. В 1965 г. на северо-востоке были открыты рудные золото-серебряные месторождения: Карамкенское, Дукатское и др. В целом отрасль развивается, растет, но при этом возникают многие проблемы, присущие только нашей стране. В России основной объем первичного серебра производится как попутный продукт месторождений из медно-никелевых (Талнахское, Октябрьское и Норильск-1, Таймырский АО), медно-цинковых руд (Учалинское и Молодежное, Республика Башкортостан) и золоторудных.

История зарождения промышленности по добыче металлов платиновой группы

Зарождение промышленности по добыче металлов платиновой группы в мире

Платина и металлы платиновой группы (МПГ) являются одними из самых редких элементов на Земле. Из немногих известных месторождений самые большие находятся в ЮАР и России. В мире насчитывается всего около десяти значимых компаний, которые занимаются добычей металлов платиновой группы. Из всех МПГ наибольшее значение имеют *платина* и *палладий*, которые добываются в значительных объемах. Остальные металлы платиновой группы — родий, рутений, иридий и осмий — добываются в значительно меньшем количестве, как побочный продукт.

МПГ подразделяют на две триады: рутений, родий и палладий — легкие платиновые металлы, а платина, иридий и осмий — тяжелые платиновые металлы.

Рутений открыт профессором Казанского университета Карлом Клаусом в 1844 г. Родий открыт в Англии в 1803 г. Уильямом Гайдом Волластоном в ходе работ с самородной платиной. Тогда же из платиновой руды, привезенной из Южной Америки, Волластон открыла и палладий. Осмий открыт в том же году английским химиком Смитсоном Теннантом в сотрудничестве с Уильямом Волластоном в осадке, остающемся после растворения платины в царской водке. Иридий был открыт в 1803 г. английским химиком С. Теннантом одновременно с осмием, которые в качестве примесей присутствовали в природной платине, доставленной из Южной Америки. Теннант был первым, кому удалось получить в достаточном количестве нерастворимый остаток после воздействия на платину царской водки и определить в нем ранее неизвестные металлы.

Впервые платину открыли испанцы в рудниках Южной Америки в XVI в. Считается, что первым в литературе упомянул о платине Скалигер в опубликованной в 1557 г. книге «Экзотерические упражнения в 15 книгах», где он рассказал о некоем веществе из Гондураса, которое нельзя расплавить. Вероятно, этим веществом и была платина. Но первое описание выполнил испанский офицер, физик и математик дон Антонио де Ульоа в 1748 г. К этому же периоду относится начало исследований доставленных из Южной Америки, с территории нынешней Колумбии, в Европу образцов платиновой руды.

В Европу комочки и крупинки серебристого металла были завезены лишь в XVIII в. испанским мореплавателем и ученым де Ульоа. На основании своих исследований он описывает платину как металл, не расплавляющийся в горне, не поддающийся ковке и не вступающий в реакцию с кислотами. Помимо этих характеристик было указано, что вес металла почти совпадает с весом чистого золота. Данное сходство сыграло не на пользу металлу-новичку. Фальшивомонетчики стали заменять им часть золота в испанских монетах. Когда обман был раскрыт, деньги Испании резко обесценились, а ее экономика была повергнута в глубокий кризис. С 1735 г. приказом короля страны вся платина была изъята и захоронена на глубокое дно, а на ее поставку был наложен запрет. Лишь в 1778 г. платину реабилитировали и снова разрешили к использованию.

Окончательные выводы о том, чем в действительности является платина, сделал в 1751 г. шведский химик Шеффер. Он определил, что это чистый металл, а не сплав, и относится он к группе драгоценных. С этого начался период поиска месторождений на Евразийском материке и по всему миру. До этого времени ее добыча производилась лишь в Колумбии.

Высокого мастерства в изготовлении платиновых изделий для научных целей достиг парижский ювелир Жаннети. Он сплавлял самородную платину с мышьяком в присутствии извести или щелочи, а затем при сильном прокаливании выжигал избыток мышьяка. Получался ковкий металл, пригодный для дальнейшей переработки.

В середине XVIII в. химики изучили свойства платины и признали ее новым элементом. Благодаря исключительной химической стойкости платину начали использовать для изготовления химического оборудования. В 1784 г. был изготовлен первый платиновый тигель, а в 1809 г. — платиновая реторта массой 13 кг; такие реторты использовали для концентрирования серной кислоты. Изделия из платины делали путемковки или горячего прессования, поскольку электропечей, дающих достаточно высокую температуру, тогда не было. Со временем научились расплавлять платину в пламени гремучего газа.

В первое десятилетие XIX в. высококачественные изделия из платины делал английский химик и инженер Волластон — первооткрыватель родия и палладия. В 1808–1809 гг. во Франции и Англии (практически одновременно) были изготовлены платиновые сосуды почти в пуд весом. Они предназначались для получения концентрированной серной кислоты. Появление подобных изделий и открытие ценных свойств элемента № 78 повысили спрос на него, цена на платину выросла, а это в свою очередь стимулировало новые исследования и поиски. В 1820 г. в Европу было доставлено от 3 до 7 т платины. Необычайно плотная платина оказалась тяжелее золота, поэтому ее считали непригодным металлом. Позже во Франции из нее был изготовлен эталон метра, а затем эталон килограмма. К середине XIX в. во Франции и Англии были проведены обширные исследования по очистке платины от других металлов. Промышленный способ получения слитков чистой платины впервые осуществили в 1859 г. химики А. Сент-Клер Девиля и Дебре, которые разработали способ выплавки больших количеств платины в пламени гремучего газа (смесь кислорода с водородом). В изобретенной ими печи, выложенной пористым известняком, было углубление, в которое помещали губчатую платину или старые изделия из платины. Это открытие преобразило металлургию платины, резко удешевило производство платиновых изделий и повысило их качество.

Спрос и цена на платину на европейских рынках стали быстро повышаться. Однако в России открытие Сент-Клер Девиля и Дебре ничего не изменило — платиной интересовались только как продуктом экспорта. С этого времени почти вся добываемая на Урале платина скупалась английскими и французскими фирмами, в частности, «Джонсон, Маттей и К». Позже к закупкам платины у России подключились американские и немецкие компании.

Зарождение промышленности по добыче металлов платиновой группы в России

В России платина была впервые найдена на Урале, в Верх-Исетском округе, в 1819 г. При промывке золотоносных пород в золоте заметили белые блестящие зерна, которые не растворялись даже в самых сильных кислотах.

Берг-пробирер лаборатории Петербургского горного корпуса В. В. Любарский в 1823 г. исследовал эти зерна и установил, что загадочный «сибирский металл принадлежит к особому роду сырой платины, содержащей знатное количество иридия и осмия». В том же году последовало высочайшее повеление всем горным начальникам искать платину, отделять ее от золота и представлять в Петербург. В 1824 г. на склоне горы Благодать, а позже в Нижнетагильском округе были открыты чисто платиновые россыпи. В следующие годы платину на Урале нашли еще в нескольких местах. Уральские месторождения были исключительно богаты и сразу же вывели Россию на первое место в мире по добыче тяжелого белого металла. В 1828 г. Россия добывала неслыханное по тому времени количество платины — 1550 кг в год, примерно в полтора раза больше, чем было добыто в Южной Америке за все годы с 1741 по 1825 г. В 1826 г. выдающийся инженер своего времени П. Г. Соболевский вместе с В. В. Любарским разработал простой и надежный способ получения ковкой платины. Самородную платину растворяли в царской водке (4 части соляной кислоты и 1 часть азотной кислоты), а из этого раствора, добавляя NH_4Cl , осаждали хлороплатинат аммония

$(\text{NH}_4)_2[\text{PtCl}_6]$. Полученный спекшийся порошок (губку) прессовали в холодном состоянии, а затем прессованные брикеты прокаливали и ковали. Этот способ позволял делать из уральской платины изделия высокого качества. 21 марта 1827 г. в конференц-зале Петербургского горного кадетского корпуса на многолюдном торжественном собрании Ученого комитета по горной и соляной части были показаны изготовленные новым методом первые изделия из русской платины — проволока, чаши, тигли, медали, слиток весом в 6 фунтов. Открытие П. Г. Соболевского и В. В. Любарского получило мировую известность. Им заинтересовался даже царь Николай I, посетивший лабораторию и наблюдавший опыты по очистке платины.

Благодаря предприимчивости министра финансов Е. Ф. Канкрин с 1828 г. в России стали выпускать платиновую монету 3-, 6- и 12-рублевого достоинства. Стоимость платины в это время была в пять раз выше стоимости серебра, поэтому чеканка монеты стала стимулом для роста добычи платины на Урале. В 1843 г. добыли уже 3500 кг платины. Разумеется, это сказалось на цене, платина стала дешевле.

Именно из-за колебаний цен на платину, из-за боязни подделки и ввоза платиновых монет из-за границы новый министр финансов Вронченко, сменивший Канкрин, прекратил чеканку платиновой монеты. По специальному указу в 1845 г. вся платиновая монета в шестимесячный срок была изъята из обращения. Это спешная паническая мера сразу же вызвала понижение цен на платину и резкий спад ее добычи. Другого применения платине в отсталой России найти не смогли. В конце 1840-х гг. на Урале добывали всего несколько пудов сырой платины в год.

В 1867 г. царский указ упразднил государственную монополию на этот металл и разрешил беспшлинный вывоз его за границу. Воспользовавшись благоприятной конъюнктурой, Англия скупила все запасы русской платины — более 16 т. Продажа сразу такого громадного количества драгоценного металла резко понизила цены на платину на мировом рынке, что не могло не сказаться на русской платиновой промышленности. Добыча платины стала менее выгодной, и постепенно, один за другим, уральские платиновые прииски стали переходить в руки английских, французских, немецких дельцов.

Перед Первой мировой войной добыча платины в России составляла 90–95% мировой добычи, но 95% русской платины уходило за границу, и лишь несколько процентов перерабатывалось на двух маленьких заводах.

Сразу же после Октябрьской революции были приняты меры по созданию мощной платиновой промышленности. В мае 1918 г. был создан Институт по изучению платины, влившийся позже в Институт общей и неорганической химии АН СССР, носящий ныне имя академика Н. С. Курнакова. В этом институте под руководством выдающихся ученых — Л. А. Чугаева, Н. С. Курнакова, И. И. Черняева — были выполнены многочисленные исследования по химии и технологиям получения платины и других благородных металлов.

Предприятия, осуществляющие добычу драгоценных металлов в России, включенные в Индекс металлов и добычи Московской биржи, преимущественно продемонстрировали рост капитализации: ПАО «Селигдар», ПАО «Полюс», «Полиметалл», ГК «Норильский никель».

Хуже общего рынка (MICEXVM1), как и в 2016 г., выглядели акции ПАО «Лензолото».

ГМК «Норильский никель» — диверсифицированная горно-металлургическая компания, крупнейший мировой производитель металлов платиновой группы, никеля, меди.

Производственные показатели по итогам девяти месяцев 2017 г. по основным производимым металлам продемонстрировали разнонаправленную динамику: палладий — рост на 2% до 2026 тыс. тр. унций (98,1% — российские активы), что связано преимущественно с увеличением содержания металла в руде; платина — на уровне девяти месяцев 2016 г. — 493 тыс. унций (98% — российские активы). По итогам 2017 г. выпуск составил: палладия — 2636–2732 тыс. тр. унций (рост на 0,7–4,4%); платины — 581–645 тыс. тр. унций (снижение на 9,8% или небольшой прирост 0,2%).

ЦИКЛЫ РАЗВИТИЯ ЗОЛОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Существуют более или менее точные сведения по истории добычи золота начиная с древних веков (4000–5000 гг. до н. э.). Известно, что золото в относительно больших количествах добывалось ассирийцами, вавилонянами, греками и позже римлянами. Добыча золота в эпоху рабовладельческого хозяйства осуществлялась с помощью промывки золотосодержащих песков, толчения и истирания коренных руд с последующей промывкой тонкоизмельченного материала. Технических приспособлений было немного, т. к. наличие дешевой рабочей силы не стимулировало их применения. С развитием товарного производства золото и отчасти серебро приобрели значение меновых эквивалентов и меры стоимости, выполняя функцию денег. Этому способствовали такие их свойства, как делимость, однородность, сохраняемость (химическая стойкость), высокая удельная стоимость.

Средние века характеризуются некоторыми усовершенствованиями в обработке руд и заметным увеличением добычи золота и серебра. Так, были созданы установки для добычи золота гидравлической промывкой россыпей. В XV–XVI вв. было введено мокрое измельчение руд в толчеях с последующей промывкой и амальгамацией. В XVI в. наиболее полное описание средневековых горно-обогатительных работ дал немецкий ученый. В 1556 г. Агрикола написал первый труд, в котором обобщил опыт горных работ, передававшийся устно от одного поколения горняков к другому. XIV–XVI вв. (позднее Средневековье) становятся переходными во многих областях техники работ: от ручного и конного ворота — к гидравлическому колесу, от тачек — к вагонеткам. Наиболее сильным толчком в развитии горных работ явилось применение черного пороха для рыхления пород. В широких масштабах рыхление и отбойку горных пород взрывным способом стали применять после того, как человек научился бурить шпуровые и скважины для размещения пороховых зарядов (1687 г.).

Добыча золота значительно возросла в 1681–1760 гг., когда в эксплуатацию были вовлечены богатые россыпи Бразилии. Производство серебра в то время также возросло в связи с открытием в Мексике, Боливии и Перу крупных месторождений этого металла. Следующий период повышения добычи золота произошел в 20–50-е гг. XIX в. в связи с открытием и интенсивной разработкой ряда россыпных месторождений в России.

Значительный подъем капиталистического хозяйства, развитие путей сообщения, крупнейший промышленный переворот, вызванный появлением паровых двигателей в промышленности и на транспорте, оживили торговые отношения, появился большой спрос на драгоценные металлы и особенно на золото, что привело к поискам и открытию новых крупных его месторождений.

Однако уже через несколько лет в золотодобывающей промышленности наступает депрессия вследствие истощения богатых золотых россыпей. В этот период начинают вводить технические усовершенствования. Механизация добычи и промывки россыпей позволяет включить в эксплуатацию бедные россыпи, ранее считавшиеся непромышленными. Появление золотопромывательных машин и станков позволяет увеличить производительность.

Строят механизированные толчейные амальгамационные фабрики для обработки коренных золотых руд. Сульфидные руды и концентраты, не поддающиеся обработке амальгамацией, подвергают окислительному обжигу, и золото извлекают хлоринацией. Часть упорных сульфидных руд перерабатывают на металлургических заводах плавкой на штейн с последующим переделом на металл.

В 1888–1889 гг. запатентован способ выщелачивания золота цианистыми растворами и осаждения его металлическим цинком. В 1890 г. этот способ был впервые реализован в промышленном масштабе, новый процесс быстро совершенствовался и вскоре получил широкое распространение во многих золотодобывающих странах. Открытие больших запасов коренных руд и создание новой прогрессивной технологии их переработки ознаменовали начало современного этапа развития золотодобывающей промышленности.

В начале XX в. золото начали добывать дражным путем, были применены паровые драги. В дальнейшем в действие ввели новые электрические драги современной конструкции,

проведена широкая модернизация старых драг, направленная на повышение скорости черпания, улучшение обогатительной схемы, — все это позволило повысить производительность. В России электрические драги начали выпускать в 1926 г.

Резкий и длительный подъем золотодобычи начался в 90-е гг. прошлого столетия. Истощение россыпных месторождений и открытие мощных запасов коренного золота потребовало разработки новых, более совершенных методов извлечения рудного золота.

Как видим, добыча закономерно возрастала век за веком, подтверждая привычные представления о прогрессе. В наши дни золото отделяется от руды с помощью цианида натрия. Амальгамирование применяют реже ввиду высокой токсичности ртути. Благодаря появлению этого метода появилась возможность добычи золота из ранее заброшенных месторождений, что возвращает их рентабельность. Перечисленные выше три способа активно используются в золотодобывающей сфере в России. Основные циклы развития золотодобывающей промышленности показаны в табл. 5.4, 5.5.

Таблица 5.4. Характеристика технологических циклов развития золотодобывающей промышленности

Период, годы	Цикл	Признак развития	Инструменты производства
До 50-х гг. до н. э.	Первый (Древний Египет)	Систематические поиски и масштабные разработки россыпных и рудных месторождений. Добыча рудного золота из жил в породах с помощью орудий труда	Каменные молоты и ударники, медные и бронзовые зубила и клинья
50-е гг. до н. э. — 500 г. н. э.	Второй (Римская империя)	Огневые работы. Разветвленные сети подземных выработок для добычи руд. Организованы арругии (подобие золотодобывающих горных предприятий). Добыча золота из рек	Использование кожаных мешков для выдачи руды. Прimitives механизмы для обогащения обрушенных пород. Подвод воды к месту работ через специальные шлюзы
500–1687	Третий (цикл гидросиловых установок)	На смену малопродуктивным способам производства приходят более производительные. Совершенствуются процессы подъема и выдачи руды. Системы водоотлива и вентиляции подземных выработок — совершенно новых работ в горном деле. Способ вскрытия, место заложения вскрывающей выработки получают технико-экономические обоснования	Для выдачи руды вместо кожаных мешков применяются бадьи, откатка по штрекам производится в тачках. Горные машины с приводом от гидравлического колеса
1687–1900	Четвертый (цикл паровых двигателей)	Механизированное бурение скважин, аналитически рассчитанные системы подземной разработки. Взрывные работы	Экскаваторы, погрузчики, буровые станки, транспортные машины с паровым и электрическим двигателем, дробильные и измельчительные установки с приводом от паровых машин
С 1900-х гг.	Пятый (повышение качества и эффективности добычи золота)	Применение гидравлического способа добычи золота, а также метода с применением цианирования	Высокопроизводительное оборудование для добычи золота и обогатительное оборудование, высокопроизводительные экскаваторы, опрокидыватели, локомотивы, проходческое буровое и погрузочное оборудование, дробильно-сортировочные комплексы, драги

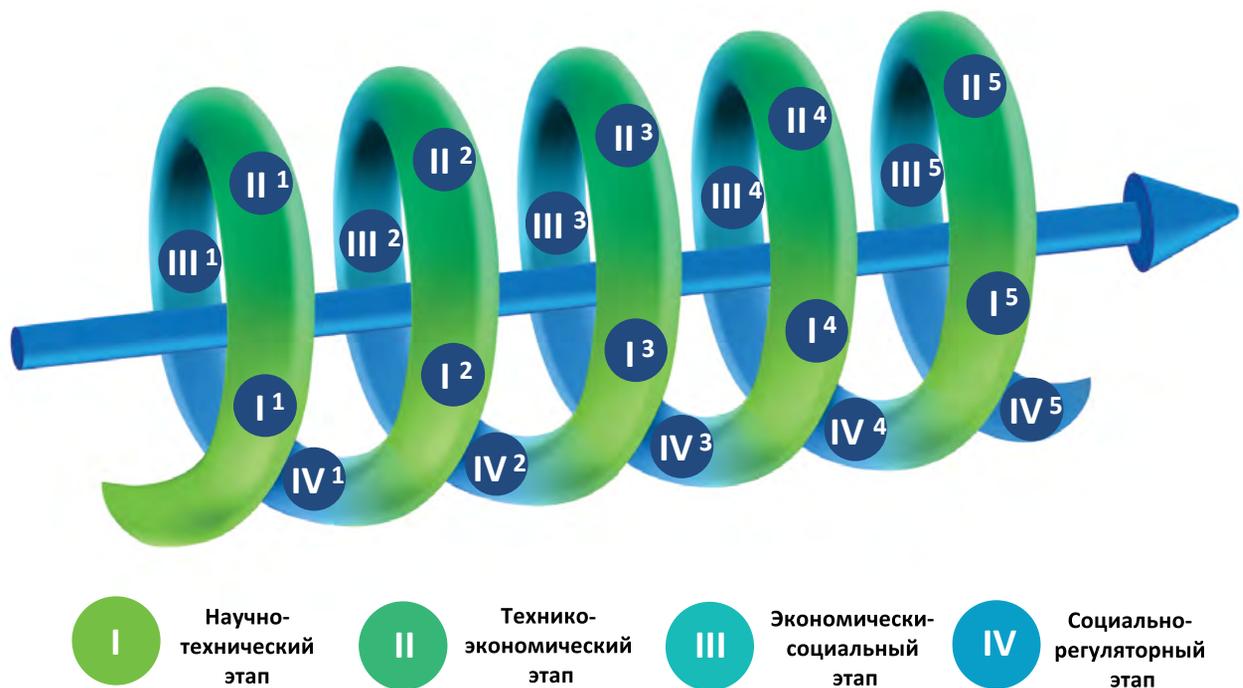
Таблица 5.5. Основные этапы циклов развития золотодобывающей промышленности

Цикл	Научно-технический этап	Технико-экономический этап	Экономическо-социальный этап	Социально-регуляторный этап
Первый (Древний Египет)	Появление механических приспособлений для добычи золота	Увеличение объемов и производительности добычи золота за счет жестокой эксплуатации рабов	Экономическая ценность и культурное значение золота	Рост численности рабочих при сохранении тяжелых условий труда
Второй (Римская империя)	Появление нового метода добычи с массовым обрушением горных пород (метод «карругий»). Амальгирование породы	Увеличение объемов и производительности добычи золота за счет большого количества завоеванных стран	Золото — фундамент финансовой системы государства	Рост численности рабочих и квалификации при сохранении тяжелых условий труда
Третий (цикл гидросиловых установок)	Применение гидравлического колеса и конного привода для подъема руды	Высокий спрос на золото	Экономическая ценность золота	Появление первого руководства по горно-обогатительным работам, рост квалификации работников, улучшение условий труда
Четвертый (цикл паровых двигателей)	Применение паровых машин	Увеличение объемов добычи золота	Активное развитие промышленности	Рост квалификации работников, улучшение условий труда
Пятый (повышение качества и эффективности добычи золота)	Применение современного эффективного оборудования и повышение качества золота	Увеличение объемов добычи золота, уменьшение себестоимости добычи золота	Рост спроса на золото	Рост квалификации работников, улучшение условий труда

Эволюция технологий добычи золота

Стоит отметить, что каждый цикл обусловлен определенным этапом, который дает новый толчок к развитию технологий. Последовательное прохождение всех этапов приводит к завершению цикла развития отрасли, после чего цикл повторяется (рис. 5.5).

Ресурсоэффективность в рамках исторического развития отраслей промышленности рассматривается как важнейший фундаментальный концепт перехода технологического развития на новый уровень. При этом метод исследования сосредоточен на изучении реакции отрасли как целого на изменяющиеся условия, без подробного описания механизма работы и внутреннего устройства той или иной технологии, так как в рамках поставленной задачи это не является первостепенным объектом изучения.



- I¹** — появление механических приспособлений для добычи золота
- II¹** — увеличение объемов и производительности добычи золота за счет жесткой эксплуатации рабов
- III¹** — экономическая ценность и культовое значение золота
- IV¹** — рост численности рабочих при сохранении тяжелых условий труда
- I²** — появление нового метода добычи с массовым обрушением горных пород
- II²** — увеличение объемов и производительности добычи золота за счет большого количества завоеванных стран
- III²** — золото как фундамент финансовой системы государства
- IV²** — рост численности рабочих при сохранении тяжелых условий труда

- I³** — применение гидравлического колеса и конного привода для подъема руды
- II³** — высокий спрос на золото
- III³** — экономическая ценность золота
- IV³** — появление первого руководства по горно-обогатительным работам, рост квалификации рабочих, улучшение условий труда
- I⁴** — применение паровых машин
- II⁴** — увеличение объемов добычи золота
- III⁴** — активное развитие промышленности
- IV⁴** — рост квалификации рабочих, улучшение условий труда
- I⁵** — применение современного эффективного оборудования и повышения качества золота
- II⁵** — увеличение объемов добычи золота, уменьшение себестоимости добычи золота
- III⁵** — рост спроса на золото
- IV⁵** — рост квалификации рабочих, улучшение условий труда

Рис. 5.5. Эволюция технологий добычи золота

ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ

Способы разработки месторождений и дальнейшей переработки добытого минерального сырья в зависимости от типа месторождения и вида драгоценного металла существенно отличаются.

При добыче драгоценных металлов из рудных (коренных) месторождений, применяются традиционные технологии разработки рудных месторождений полезных ископаемых. Добытое минеральное сырье перерабатывается по специальным технологиям, учитывающим специфику и физико-химические свойства извлекаемого драгоценного металла.

Добыча драгоценных металлов из россыпных месторождений

Горно-подготовительные работы

Горно-подготовительные работы включают в себя процессы, обеспечивающие подготовку месторождения к эксплуатации.

В комплекс горно-подготовительных работ входят: подготовка поверхности месторождения, осушение площади месторождения, проведение вскрывающих выработок.

Осушение россыпей, как правило, производится канавами. По назначению и расположению канавы могут быть: руслоотводными, нагорными, разрезными, капитальными, водозаводными.

При больших глубинах залегания пласта песков, когда осушение карьера невозможно осуществить капитальной канавой, устанавливается насосная станция.

Вскрывающие выработки обеспечивают доступ к пласту песков. Для россыпных месторождений вскрывающей выработкой обычно является пионерный котлован (или пионерный блок). Для дражного способа разработки вскрывающая выработка представляет собой котлован, в котором производится монтаж драги.

Вскрышные работы

Задача вскрышных работ — удаление и перемещение в отвалы пустых пород (торфов), перекрывающих пласт песков. Различают три основные операции вскрышных работ: непосредственно вскрыша («чистая» вскрыша), перемещение в отвал (отвалообразование) и перевалка.

Перевалка чаще всего применяется при ведении вскрышных работ экскаваторами-драглайнами.

По способу выемки торфов вскрышные работы разделены на две группы — системы с послонной выемкой и с выемкой на всю глубину.

На мерзлых россыпях при их разработке слоями по мере их естественного оттаивания основной вскрывающей машиной является бульдозер и очень редко — колесный скрепер. В целях экономии топлива помимо бульдозеров используют автосамосвалы или колесные погрузчики.

Выемка торфов на всю мощность применяется либо на талых россыпях, либо на мерзлых после буровзрывного рыхления. Выемка торфов на всю мощность применяется после буровзрывного рыхления с помощью шагающих драглайнов или гидравлических экскаваторов с погрузкой в автосамосвалы. Также возможно применение экскаватора с размещением торфов сразу в постоянный отвал.

Разработка и транспортировка песков

Пески можно разрабатывать одновременно с их промывкой или в разное время. В первом случае пески сразу же после их отделения от массива поступают на промывочную установку, во втором — накапливаются в специальных отвалах на поверхности и поступают на промывку только в теплое время года.

Разработка многолетнемерзлых и сезонномерзлых песков открытым способом производится только бульдозерами путем послойного снятия верхнего оттаявшего слоя. Талые пески разрабатываются бульдозерами или экскаваторами.

Особой технологии требует разработка высокольдистых песков, которые после оттаивания превращаются в пльвуны, не поддающиеся транспортированию бульдозерами. Такие пески лучше разрабатывать в холодный период путем рыхления пласта бульдозером-рыхлителем и последующей вывозки в плоский спецотвал вблизи промывочной установки. С наступлением тепла с поверхности мерзлого отвала послойно снимаются пески и подаются на промывочную установку.

Транспортировка вынутых песков к промывочной установке при небольших расстояниях (до 100 м) производится бульдозерами, а при удаленности промывочной установки более чем на 100 м пески доставляют колесными погрузчиками или автосамосвалами.

Переработка песков на промывочных установках

Промывочные установки включают в себя два узла: узел дезинтеграции и грохочения песков и узел обогащения подгрохотной фракции (эфельная фракция).

Узел дезинтеграции и грохочения используется четырех типов:

- неподвижный перфорированный стол с отверстиями 50–100 мм с размывом подаваемых на стол песков струей гидромонитора (применяется для хорошо промывистых песков с крупным золотом);
- скруббер-бутара в виде цилиндра, имеющего глухой дезинтегрирующий став и перфорированный для высевания золотосодержащей фракции (применяется для хорошо и среднепромывистых песков, включающих гравийно-галечную фракцию, способствующую при вращении скруббер-бутары дезинтеграции песков);
- пластинчатый грохот с подвижным наклонным полотном, которому придается бегущая поперечная волна, обеспечивающая переваливание песков и истирание комковатого материала (применяется для хорошо промывистых песков с включением крупных (до 1 м) глыб и валунов);
- двух- и трехситные виброгрохоты с площадью просеивающей поверхности 10–12 м² (применяются для средне- и труднопромывистых песков).

Состав узла обогащения подгрохотной фракции зависит от крупности золота и может включать в себя следующие аппараты для улавливания золота:

- шлюзы глубокого и среднего наполнения (для крупного золота — более 1 мм);
- шлюзы мелкого наполнения с подшлюзками (для золота средних размеров — 0,5 мм);
- отсадочные машины и концентрационные столы (для мелкого золота, содержащего фракции менее 0,1 мм);
- центробежные аппараты (для золота, содержащего значительные доли золота мельче 0,05 мм).

Подача песков на дезинтеграцию и грохочение осуществляется бульдозерами (на неподвижный перфорированный стол), экскаваторами (в бункер скруббер-бутары или виброгрохота), автосамосвалами и колесными погрузчиками (в бункер-питатель скрубберных и шлюзовых промывочных установок).

В результате промывки песков образуется три вида хвостов:

- галечная фракция (надгрохотный продукт узла дезинтеграции и грохочения);
- зернистая фракция (эфельный материал, накапливающийся вблизи промывочной установки);
- илесто-шламовая фракция (тонкодисперсный материал, переносимый водным потоком в углубленные участки илоотстойника).

Для обеспечения бесперебойной работы промывочных установок галечная и зернистая части хвостов периодически удаляются в отвал бульдозером или колесным погрузчиком.

Площадка переработки песков включает в себя кроме промывочной установки илоотстойник, огороженный защитными дамбами, и систему оборотного водоснабжения. Она состоит из переставной насосной станции, зумпфа, защищенного дамбой от попадания в него илесто-шламовой фракции хвостов, и напорного водовода.

Дражный способ разработки россыпных месторождений

Дражный способ применяется для разработки обводненных россыпей, представленных породами различной крепости. Исключение составляют весьма валунистые, крепко сцементированные породы и вязкие глины. Многолетнемерзлые россыпи могут разрабатываться драгами только после предварительной их оттайки.

Обязательными горно-подготовительными операциями являются удаление пустых пород, оттайка многолетней мерзлоты (при ее наличии) и предохранение талых переходящих на следующий промывочный сезон запасов от сезонного промерзания.

Вскрышные работы выполняются той же техникой, что и при отдельном способе разработки россыпей.

Оттаивание мерзлых пород производится следующими основными методами:

- теплом солнечной радиации (для небольшой мощности пласта);
- фильтрационно-дренажным (для песков с хорошей фильтрационной способностью);
- гидроигловым с использованием естественно нагретой воды (для глубины залегания песков 5 м и более);
- гидроигловым с использованием горячей воды или пара (применяется в небольших объемах в начале промывочного сезона).

Обогатительное оборудование на драге подбирается по такому же принципу, что и для промывочных установок, т. е. исходя из крупности золота. Как правило, на современных драгах в качестве основных улавливающих аппаратов устанавливаются отсадочные машины. В общем виде драга приведена на рис. 5.6.

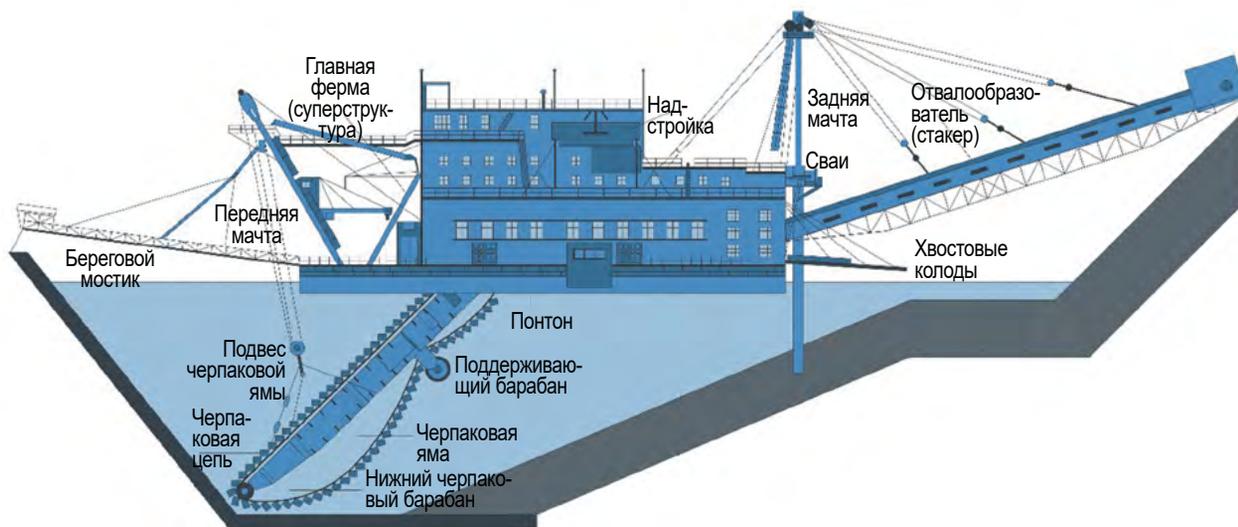


Рис. 5.6. Общий вид драги

Подземный способ разработки россыпных месторождений

Подземный способ разработки применяется для разработки многолетнемерзлых россыпей с глубиной залегания пласта более 20 м.

Выбор способа разработки — открытый или подземный — определяется по результатам технико-экономического сравнения вариантов.

Вскрытие пласта производится наклонным стволом с углом наклона 10–30°. Подготовительные и нарезные выработки проходят по пласту песков. Высота главного (транспортного) штрека равна 2 м (но не меньше мощности пласта), а вентиляционной выработки — 1,5 м.

Отбойку породы как при подготовительных работах, так и при очистных производят буровзрывным способом.

Уборка отбитой породы осуществляется скреперными лебедками или погрузо-доставочными машинами. Выдается порода на дневную поверхность ленточным конвейером по наклонному стволу.

Промывка добытых песков проходит в теплый период года при послойном оттаивании песков, уложенных в виде плоского отвала.

Переработка золотосодержащих концентратов, добытых на россыпных месторождениях

Полученный в процессе первичной переработки россыпей концентрат (шлих) доводится на шлихообогащательных установках (ШОУ) до получения шлихового золота, направляемого на аффинаж в качестве конечного продукта, либо на плавку с получением слитков золота лигатурного. В последнее время концентраты россыпного золота стали подвергаться интенсивному цианированию.

Добыча драгоценных металлов из коренных (рудных) месторождений

Способы разработки коренных (рудных) месторождений

Разработка месторождений драгоценных металлов, как правило, производится подземным, открытым или комбинированным способом.

Выбор способа разработки определяется горно-геологическими условиями залегания руд и обосновывается технико-экономическими расчетами. Если месторождение достигает поверхности Земли или находится недалеко от поверхности, то применяется открытый способ. Более глубоко расположенные месторождения разрабатываются обычно подземным способом. Как вариант разработка начинается открытым способом и по мере углубления карьера продолжается подземным способом (комбинированный способ).

Подземный способ разработки коренных (рудных) месторождений

В процессе подземной разработки месторождений руд драгоценных металлов можно выделить три основные стадии горных работ: вскрытие месторождения, подготовительные работы (разделение месторождения на этажи и очистные блоки) и добычные работы непосредственно внутри очистного блока (нарезные и очистные работы).

Вскрытие осуществляется проведением главных выработок с земной поверхности до месторождения. К ним относятся вертикальные и наклонные стволы, штольни и автотранспортные съезды (уклоны). Эти выработки служат для транспортирования полезного ископаемого на поверхность, а также для передвижения людей, оборудования, доставки материалов и других целей. Проходка вскрывающих выработок — наиболее дорогостоящий процесс, особенно при вскрытии месторождения вертикальными стволами, осуществляется, как правило, буровзрывным способом с отбойкой руды шпурами и производится по пустым породам, которые необходимо складировать на поверхности.

Подготовка шахтного поля к очистной выемке заключается в разделении его на этажи проведением выработок основного горизонта, а также в разделении этажа на выемочные участки (очистные блоки). Проходятся они по пустым породам (полевые выработки), буровзрывным способом с отбойкой руды шпурами, но большая часть их проходится одновременно с очистными работами.

Добыча полезных ископаемых (нарезные и очистные работы) производится системами разработки, которые зависят от горно-геологических и горнотехнических условий отработки этого очистного блока.

Системы разработки между собой отличаются:

- последовательностью выемки частей этажа;
- направлением подвигания очистной выемки относительно выработок основного горизонта;
- состоянием выработанного пространства во время разработки;
- способами отбойки руды при очистной выемке;
- способами перемещения руды в очистном пространстве.

Открытый способ разработки коренных (рудных) месторождений

Основные технологические процессы открытых разработок месторождений включают в себя: подготовку горных пород к выемке — отделению горных пород (или полезных ископаемых) от массива с одновременным ее механическим или взрывным рыхлением; погрузку горной массы в средства транспорта; транспортирование горной массы из забоев на промышленную площадку железнодорожным транспортом, автомобилями, конвейерами, гидротранспортом, подвесными канатными дорогами и др.; размещение пустых пород в отвалах; планирование отвалов; рекультивацию в соответствии с планом горных работ.

Кроме основных технологических процессов на карьерах выполняются вспомогательные работы. Все основные производственные процессы объединяются в единую технологическую схему открытых разработок месторождений.

Технологии первичной переработки минерального сырья

В настоящее время основная часть мировых запасов драгоценных металлов приходится на коренные руды, находящиеся в недрах в виде монолитной горной массы. Разработке подвергают достаточно крупные месторождения (с запасами по золоту не менее ~0,5 т) со строительством крупнотоннажных мощностей (0,05–50 млн т минерального сырья в год) по переработке, обеспечивающих рентабельность производства.

Первичную переработку минерального сырья осуществляют преимущественно на механизированной непрерывно действующей фабрике, что позволяет осуществить переработку за небольшой срок (0,1–10 сут) с извлечением металла 70–95%.

Степень концентрирования золота и серебра в процессе переработки исходного минерального сырья и получения лигатурного металла составляет величину порядка 10^5 – 10^6 . При этом переделы первичной переработки минерального сырья (рудо- и пульпоподготовка, цианирование руды или хвостов обогащения) отличаются большой производительностью от десятков тысяч тонн до нескольких десятков миллионов тонн в год, в то время как переделы получения готовой продукции характеризуются периодическим малотоннажным производством с выпуском металла от десятков килограмм до нескольких тонн в год.

Рудоподготовка

Рудоподготовка является одной из основных операций переработки коренных руд. Основная ее задача состоит в получении продукта заданной крупности, обеспечивающей достаточно полное раскрытие ценных компонентов. Складирование и усреднение руд производится на рудном складе с дробильным комплексом.

Предобогащение руды позволяет выделить из руды пустую породу с отвальным содержанием золота и исключить ее из процесса переработки. Сортировка руды позволяет разделить ее на сорта по содержанию ценного компонента либо по технологическим свойствам с раздельной переработкой полученных сортов по различным оптимальным технологиям. Для предобогащения и сортировки используют сепараторы специальной конструкции.

Рудоподготовка подразумевает дробление горной массы до оптимальной крупности и проводится в несколько стадий. Для первичного дробления руд используют щековые и конусные дробилки, для мелкого — короткоконусные.

Пульпоподготовка подразумевает обезвоживание пульпы до массовой доли твердого, необходимой для проведения дальнейших операций. Дробление руды осуществляют в одну, две или три стадии. Первая стадия — измельчение до крупности 100–350 мм. Вторая стадия — измельчение до крупности 20–100 мм. Третья стадия — измельчение до крупности 5–30 мм. На первой и второй стадиях используют щековые или конусные дробилки, на третьей — конусные, валковые, шнеко-зубчатые и др. Целесообразным является межстадийное грохочение и классификация для вывода материала готовой крупности.

Измельчение золото- и серебросодержащих руд и продуктов их обогащения чаще всего осуществляют в водной среде в шаровых мельницах, мельницах само- и полусамоизмельчения барабанного типа различной конструкции. Наибольшее распространение получило двух- и трехстадийное измельчение с самоизмельчением либо полусамоизмельчением на первой стадии до крупности 2–50 мм и шаровым измельчением на второй и третьей стадиях до крупности 0,04–0,5 мм. Широко распространены при переработке золото- и серебросодержащего минерального сырья процессы классификации. При многостадийном дроблении и измельчении минерального сырья они позволяют выделять фракцию готовой крупности, что минимизирует холостую нагрузку на дробильно-измельчительное оборудование (повышает энергоэффективность производства) и позволяет избежать переизмельчения минерального сырья. Для классификации крупных продуктов (20–200 мм) обычно применяют вибрационные и барабанные грохота. Для продуктов средней крупности (2–20 мм) применяют вышеуказанные аппараты, а также спиральные, речные и чашевые классификаторы. Для классификации тонких продуктов (крупностью 0,02–2,0 мм) наиболее широкое распространение получили гидроциклоны различной конструкции. Для отделения пульпы от гранулированных искусственных сорбентов крупностью 0,8–3,0 мм при сорбционном выщелачивании применяют грохочение пульпы на вибрационных, барабанных и статичных грохотах (дренажах), оборудованных сеткой с размером ячейки 0,6–0,8 мм.

После измельчения и классификации получаемая пульпа разжижена до отношения $J : T = 5 : 1$ и выше. Перед гидрометаллургической переработкой целесообразным является сгущение пульпы до отношения $J : T = (1-2) : 1$. Сгущению могут подвергать отвальные хвосты обогащения с целью возврата оборотной воды на фабрику. Для увеличения скорости осаждения используют коагулянты и флокулянты, приводящие к агрегации осаждаемых частиц. Для сгущения крупнотоннажных потоков пульпы обычно применяют непрерывно действующие аппараты различных типов: радиальные сгустители с центральным и периферийным приводами, скоростные, пастовые и пластинчатые сгустители. Для осветления небольших объемов богатых золотосодержащих растворов (или растворов, содержащих богатые шламы) могут быть использованы обычные баки периодического действия или отстойники другого типа.

Фильтрация пульпы заключается в разделении твердой и жидкой фаз с помощью пористой перегородки, через которую жидкая фаза проходит, а твердая — нет. Фильтрацию проводят с целью отделения растворенных драгоценных металлов или самой жидкой фазы, либо с целью удаления из пульпы вредных растворенных примесей. В результате образуется чистый фильтрат и влажный осадок (кек). Для фильтрации крупнотоннажных потоков используют пресс-фильтры. Для малотоннажных потоков могут использовать пресс-фильтры, а также непрерывно действующие дисковые и барабанные вакуум-фильтры и др.

Нутч-фильтры применяют в отделении готовой продукции для фильтрации малых объемов весьма богатых концентратов.

Противоточная декантация является одним из способов извлечения растворенных ценных (золото и серебро) или вредных (кислые продукты автоклавного окисления, токсичные цианидные соединения и др.) компонентов из пульпы. Основные факторы, определяющие эффективность противоточной декантации, — это сгущаемость твердой фазы пульпы и сорбционная активность твердой фазы пульпы по отношению к извлекаемому компоненту. Периодическую декантацию используют для промывки небольшого количества богатых по золоту и серебру концентратов после выщелачивания.

Центрифугирование является одним из известных методов разделения твердой и жидкой фаз пульпы. Существуют промышленные центрифуги с периодическим и непрерывным режимами работы. На предприятиях применяется в достаточно редких случаях.

Обогащение

Суть процесса обогащения состоит в отделении ценных компонентов от пустой породы, а также во взаимном отделении ценных компонентов на основе различия их физических и физико-химических характеристик. Обогащение используется для переработки как первичного минерального сырья драгоценных металлов (россыпные и коренные руды), так и вторичного (доводка и переработка концентратов текущей добычи, обогащение лежалых хвостов гравитации, флотации, амальгамации и др.).

Гравитационные методы обогащения основаны на высокой плотности драгоценных металлов и их минералов, которая существенно выше плотности пустой породы. Данные методы особенно эффективны при извлечении крупного золота (размер частиц более 0,1 мм).

Флотационные методы используют различия в поверхностных свойствах минералов (смачиваемость). Высокая эффективность данных методов определяется возможностью извлечения как сульфидных минералов, обогащенных драгоценными металлами, из бедного минерального сырья (руды, хвосты гравитации), так и свободного тонкого золота.

Также применяются методы, основанные на различии магнитных свойств и электропроводности минералов. Зачастую целесообразным является использование простых или сложных комбинаций одного или нескольких из указанных методов.

Гидрометаллургия руд и концентратов

Гидрометаллургические методы заключаются во взаимодействии минерального сырья в водной среде с определенными реагентами, приводящими к растворению полезных или вредных компонентов. При растворении полезных компонентов (золота и серебра) их затем (или одновременно) извлекают из жидкой фазы известными методами. При растворении вредных компонентов нерастворимый остаток затем перерабатывают с целью извлечения драгоценных металлов.

В промышленной практике применяются гидрохимические, бактериально-химические и механохимические способы вскрытия сульфидного минерального сырья, а также другие специальные методы предварительной обработки, предваряющие процесс непосредственного выщелачивания драгоценных металлов.

Автоклавное окисление сульфидов заключается в обработке пульпы техническим кислородом и обеспечивает максимальное извлечение золота по сравнению с другими способами предварительного вскрытия.

Бактериальное окисление заключается в окислении сульфидных минералов кислородом воздуха при помощи особых бактерий и обеспечивает высокое извлечение золота при последующем выщелачивании без использования кислорода.

Сверхтонкий помол (до крупности 5–40 мкм) обычно применяют для относительно богатых (10–100 г/т) упорных золото- и серебросодержащих концентратов (содержащих

тонковкрапленные ценные компоненты) как операцию предварительного вскрытия перед цианированием или жидкофазным окислением. Данный вид оказывает заметное повышение извлечения ценных компонентов при последующем цианировании либо заметное увеличение эффективности последующего жидкофазного окисления сульфидов.

Известково-кислородное окисление заключается в окислении сульфидов кислородом в мягких условиях при атмосферном давлении. К преимуществам данного метода относятся: снижение расхода реагентов по сравнению с автоклавным и бактериальным методами окисления и снижение расхода реагентов на цианирование окисленных концентратов.

Кислотно-кислородное окисление заключается в достаточно быстром окислении сульфидных золото- и серебросодержащих минералов азотной кислотой (и оксидами азота), непрерывно регенерируемой в ходе процесса при использовании кислорода. Основными преимуществами процесса кислотно-кислородного окисления являются высокие показатели окисления сульфидов и вскрытия ценных компонентов.

Сернокислотное выщелачивание служит для удаления примесей (цветных металлов и др.), вредных для последующего извлечения золота и серебра из минерального сырья (руды, концентраты обогащения, цементные осадки и др.).

Сульфидно-щелочное выщелачивание основано на способности сульфидно-щелочных растворов (Na_2S и NaOH) растворять сульфидные и окисленные минералы сурьмы.

Растворение (выщелачивание) драгоценных металлов

Подавляющее большинство золото- и серебросодержащих руд и концентратов содержит значительное количество полезных компонентов в виде мелких частиц (менее 0,1 мм), которые практически невозможно сконцентрировать обогатительными методами до приемлемой степени. Поэтому применяют гидрометаллургические методы, включающие в себя процесс растворения драгоценных металлов с последующим их извлечением из пульпы и растворов.

Применение цианидных растворителей является наиболее распространенным промышленным способом извлечения драгоценных металлов. По различным оценкам 75–85% мировой добычи золота связано с использованием технологии цианирования. Сущность процесса заключается в выщелачивании драгоценных металлов цианидами (в основном NaCN) в присутствии кислорода. В случаях, когда невозможно применить цианиды для промышленного извлечения драгоценных металлов, используют нецианидные растворители, такие как тиокарбамид, тиосульфаты, галоген-галогенидные системы и др.

Агитационное выщелачивание заключается в перемешивании (агитации) пульпы и характеризуется наиболее благоприятными условиями диффузионного подвода реагентов и отвода продуктов реакции от поверхности выщелачиваемых драгоценных металлов. Крупность материала при агитационном выщелачивании составляет от минус 0,02 мм до минус 0,3 мм в зависимости от характера вкрапленности драгоценных металлов. Наиболее широко распространенной разновидностью агитационного выщелачивания руд и концентратов является сорбционное выщелачивание, которое проводится в присутствии искусственного сорбента (ионообменной смолы или активного угля) значительно большей крупности (0,8–3 мм), чем выщелачиваемое сырье (минус 0,07–0,2 мм). При этом процессы выщелачивания драгоценных металлов в раствор и их извлечение оттуда искусственным сорбентом происходят одновременно. Разница в крупности сорбента и твердой фазы пульпы позволяет отделить выщелоченные и извлеченные на сорбент ценные компоненты путем простого грохочения.

Интенсивное цианирование используется при переработке первичных гравитационных концентратов и промпродуктов доводки концентратов с содержанием золота, недостаточным для прямой плавки на слиток.

Обезметалливание растворов и пульпы

При первичной переработке минерального сырья драгоценных металлов гидрометаллургическими методами применяют следующие методы обезметалливания продуктивных

растворов: цементация на цинк, алюминий и др.; сорбционные методы с использованием ионообменных смол или активных углей; электролитическое осаждение; химическое осаждение в виде нерастворимых соединений.

Сорбционные и цементационные методы являются более универсальными, так как позволяют эффективно обезметалливать как крупнотоннажные потоки бедных растворов с концентрацией золота и серебра 0,1–50 мг/л, так и небольшие количества богатых растворов с концентрацией драгоценных металлов десятки и сотни миллиграммов на литр.

Переработка комплексного и упорного золотосодержащего минерального сырья

Зачастую наряду с золотом и серебром в минеральном сырье в значительных количествах присутствуют другие полезные и/или вредные компоненты, существенно влияющие на технологию его переработки (цветные металлы, органический углерод и др.).

В золотомедных рудах содержание меди может достигать 0,5% и более. Медь извлекают в виде сульфидных и некоторых окисленных форм флотационным или гидрометаллургическими методами с последующей переработкой.

В золотосурьмяных рудах и концентратах при содержании сурьмы более 1% ее извлечение происходит флотационным методом с последующей переработкой по пирометаллургической или гидрометаллургической технологии.

Высокоуглеродистые руды и концентраты содержат золото и углерод, последний в ходе цианирования сорбирует драгоценные металлы. Доля потерь может достигать до 99%. Для концентрации минералов золота и серебра и удаления углерода используют гравитационно-обогатительные методы.

Для извлечения золота из руд и концентратов с тонковкрапленным золотом обычно используют гравитационно-флотационное обогащение с последующей переработкой упорной фракции специальными методами, минимизирующими упорность.

Пирометаллургия концентратов

Пирометаллургические методы обычно применяют для переработки относительно богатых золото- и серебросодержащих концентратов. Передел получения готовой продукции содержит следующие последовательные операции: обжиг и плавку богатых золотосодержащих полупродуктов. Обжиг проводят в камерных (подовых) печах, он позволяет удалить или окислить ряд примесей, вредных для плавки. Бесколлекторную плавку на слиток ведут в индукционных тигельных или электродуговых руднотермических печах с применением флюсов (бура, сода, стекло, шлак и др.). После чего получают слитки.

Пирометаллургические методы могут быть применены для переработки относительно небогатых упорных сульфидных, высокоуглистых и других концентратов. В таком случае огарки являются достаточно бедными для прямой плавки на слиток и требуют дальнейшей переработки (методом цианирования и др.).

Извлечение золота и серебра из бедного и забалансового минерального сырья проводят с помощью геотехнологий. Геотехнологии характеризуются меньшей степенью извлечения золота и удельной стоимостью, подразумевают применение кучного или подземного выщелачивания.

Кучное выщелачивание заключается в орошении выщелачивающим раствором дробленой руды, уложенной в виде штабеля (кучи) на водонепроницаемом основании.

Подземное выщелачивание заключается в прокачивании выщелачивающего раствора через рудное тело, залегающее в недрах, для чего пробуривают закачные и откачные скважины (рис. 5.7). Одним из главных факторов, определяющих эффективность применения процесса подземного выщелачивания является проницаемость руды. Метод дает возможность рентабельно обрабатывать месторождения, разработка которых традиционными способами невыгодна.

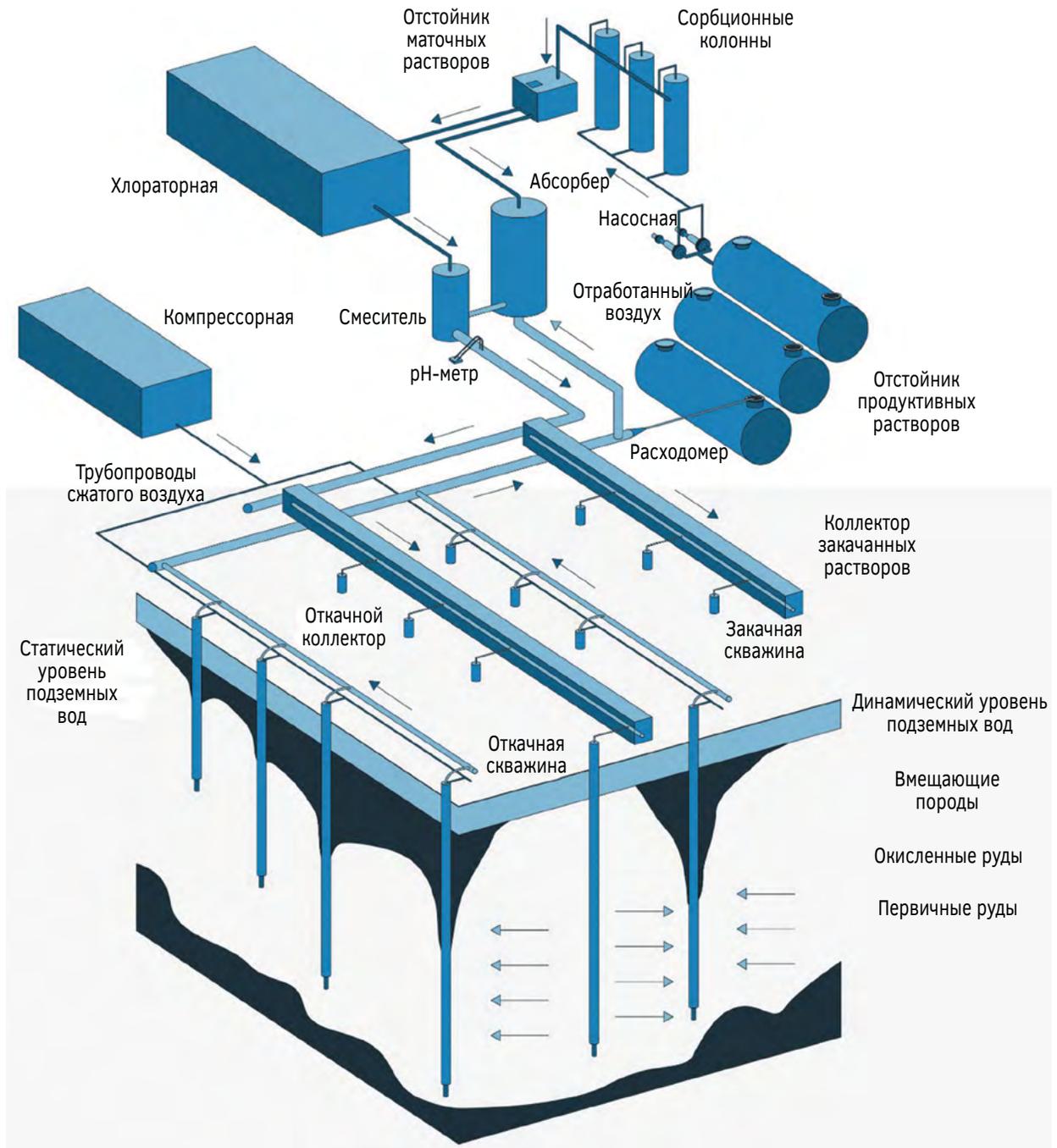


Рис. 5.7. Технология процесса подземного выщелачивания

СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ

В зависимости от условий залегания рудных месторождений и мощности залежей разработка осуществляется открытым или подземным способом.

Преимуществами открытого способа разработки месторождений являются:

- низкая себестоимость минерального сырья;
- возможность добычи минерального сырья начиная с первого года разработки параллельно проводимым горно-капитальным работам;
- отсутствие необходимости искусственной вентиляции района ведения работ;
- большая, по сравнению с подземным способом разработки, производительность добычных работ.

К недостаткам открытого способа разработки относятся:

- нарушение земель, снятие почвенно-растительного слоя со всеми вытекающими негативными последствиями для окружающего животного мира;
- необходимость сбора и очистки атмосферных осадков и подземных вод со всей площади нарушаемых земель, строительство необходимых для этого сооружений, иногда искусственное отведение рек;
- необходимость рекультивации нарушенных земель;
- зависимость от климатических условий района ведения работ.

Основными преимуществами подземного способа разработки месторождений являются:

- возможность разработки месторождений на большую глубину (до 4 км);
- при разработке тонких и маломощных рудных тел возможность их селективной выемки без разубоживания руд пустыми породами с максимальным содержанием металла в отбитой руде;
- возможность оставления отбитых пустых пород от проходческих работ в руднике в качестве закладки отработанных пустот, в результате чего исключаются перемещение большого количества пустых пород и необходимость их складирования на поверхности.

К недостаткам подземного способа разработки относятся:

- высокая себестоимость добычи минерального сырья в результате больших материальных, трудовых и энергетических затрат;
- как правило, необходимость крепления горных выработок и поддержание этой крепи на необходимый срок, иногда до конца разработки месторождения;
- высокие затраты на транспортировку добытой руды как внутри рудника, так и по поверхности к месту обогащения;
- трудности в обеспечении безопасности горных работ.

Следует отметить, что добыча руды подземным способом требует существенно меньшего отчуждения земель и не вызывает столь значительных нарушений и изменений инфраструктуры и ландшафтов, как открытые горные работы. Открытый способ добычи характеризуется более высоким расходом топлива и взрывчатых веществ (рис. 5.8).

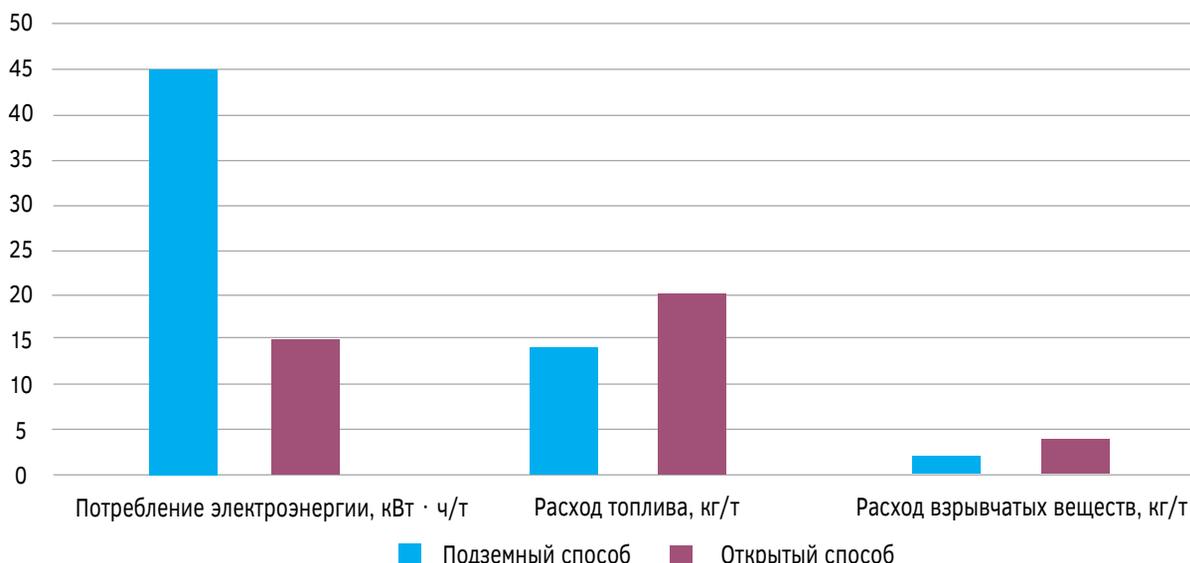


Рис. 5.8. Сравнение технологий

РОЛЬ ДОБЫЧИ ДРАГОЦЕННЫХ МЕТАЛЛОВ В ГЛОБАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКЕ

Золото и драгоценные металлы играют очень важную роль в жизни людей. Интерес к драгоценным металлам не ослабевает благодаря не только их естественным уникальным свойствам, но и той роли, которую они играли и продолжают играть в экономике различных стран мира. В древние времена золото выполняло роль денег, сейчас хоть оно и утратило эту функцию, но все равно остается одним из самых ликвидных и надежных активов для вложения средств. Практически все государства в мире держат часть своих резервов в золоте и драгоценных металлах, что позволяет странам обезопасить себя от колебаний мирового рынка, также от кризисов. Это связано с тем, что золото и драгоценные металлы независимы и не являются ни чьим-либо долговым обязательством.

В современной экономике золото и драгоценные металлы выполняют следующие функции:

- 1) обеспечивают финансовую безопасность (на случай кризиса), так как являются наиболее ликвидным международным средством платежа;
- 2) помогают диверсифицировать официальные резервные активы;
- 3) обеспечивают экономическую безопасность как уникальные активы, которые не являются чьим-либо долговым обязательством;
- 4) обеспечивают политическую безопасность, они не зависят от валютного контроля или замораживания активов, при необходимости они всегда могут быть использованы.

Российская Федерация занимает достаточно сильные позиции на мировом рынке драгоценных металлов:

- 1-е место по добыче палладия,
- 2-е место по добыче платины (после ЮАР),
- 3-е место по добыче золота (после Китая и Австралии) (рис. 5.9),
- 5-е место по добыче серебра (после Мексики, Перу, Китая, Чили),
- 6-е место по объему золотых резервов государства.

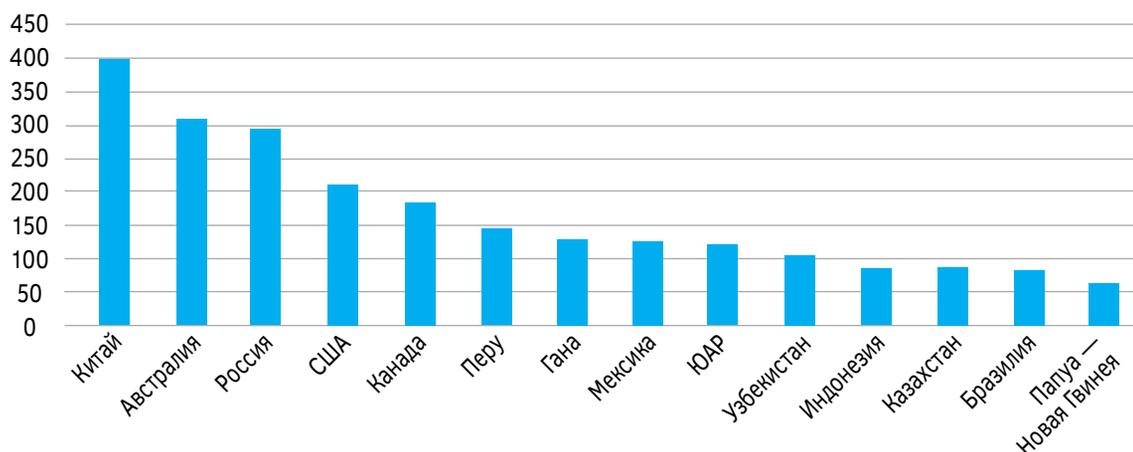


Рис. 5.9. Добыча золота по странам (2018 г.)

Наряду с ЮАР Россия является мировым лидером по размеру сырьевой базы золота, в ее недрах заключено почти 12% его мировых запасов. Государственным балансом запасов полезных ископаемых Российской Федерации учитывается в недрах более 13,1 тыс. т драгоценного металла; на долю разведанных приходится более 8 тыс. т. По объему добычи металла из недр Россия в 2017 г. заняла третье место в мире после Китая и Австралии.

Запасы серебра в недрах РФ подсчитаны в количестве 121,7 тыс. т. Это одна из крупнейших сырьевых баз серебра, заключающая около 8% его мировых ресурсов. Россия занимает пятую позицию в мире по объему сырьевой базы серебра, уступая Мексике, Перу, Китаю

и Чили. Качество руд российских месторождений в целом соответствует мировым аналогам. Серебряные месторождения заключают около 21% российских запасов серебра.

Минерально-сырьевая база металлов платиновой группы (МПГ) Российской Федерации значительна и составляет 15 тыс. т. Промышленные запасы эксплуатируемых и осваиваемых месторождений в России достигают 4 тыс. т, т. е. составляют примерно пятую часть мировых, поэтому РФ прочно занимает вторую позицию в мире после ЮАР.

По разведанным запасам золота Россия занимает четвертое место в мире (после ЮАР, США и Канады) и первое место среди стран СНГ. Россыпи составляют 20% запасов, коренные месторождения — 52%, комплексные — 28%.

Стратегическое значение рынка драгоценных металлов для России определяется стабильным поступлением налогов из данной сферы экономики в доходную часть бюджета, а также пополнением золотовалютных резервов Российской Федерации — Золотого запаса, Государственного фонда драгоценных металлов и драгоценных камней, Алмазного фонда.

Процесс либерализации сферы добычи, производства, использования и обращения драгоценных металлов, формирование и переход к рыночным механизмам регулирования российского рынка драгоценных металлов в середине 90-х гг. XX в. вызвал резкий спад объемов добычи и производства драгоценных металлов, уменьшение спроса на отечественную продукцию из драгоценных материалов, ухудшение социально-экономических условий золотодобывающих и перерабатывающих регионов.

Рынок драгоценных металлов представляет собой механизм, являющийся важнейшей составной частью производства, распределения и потребления финансовых активов, обеспечивающий и регулирующий потребности путем реализации продуктов добычи и перераспределения высвобожденных запасов.

В современной экономике роль драгоценных металлов существенно изменилась — золото больше не является «мировыми деньгами», но благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам драгоценные металлы все шире входят в сферу промышленного производства, особенно в отраслях, использующих новейшие технологии. Высокая удельная ценность (редкость, компактность, возможность неоднократного потребления и длительного использования), ликвидность (развитая сеть сбыта и постоянный спрос) определяют использование драгоценных металлов в качестве финансовых активов.

Инвестиции в людей

По всему миру в золотодобывающей промышленности напрямую занято более 1 млн человек (на 2013 г.), еще более 3 млн человек — в снабжении. Золотодобыча не обеспечивает большого количества рабочих мест по сравнению с другими отраслями, однако ценятся они выше.

Работа в золотодобывающей промышленности оплачивается существенно выше, чем в других отраслях. Особенно это характерно для развивающихся стран, где на каждого работника приходится большое число членов семьи, которых он обеспечивает. Так, в Кот-д'Ивуаре или Монголии самый низкооплачиваемый работник горнодобывающего предприятия зарабатывает в 3,5 раза больше средней местной зарплаты.

На предприятиях в большинстве регионов мира 90% работников — местные жители. В этом смысле отрасль работает очень хорошо, например, по сравнению с нефте- и газодобывающей промышленностью, в которых основная рабочая сила — иностранные специалисты или люди, не проживающие на постоянной основе в районе добычи.

Также в деятельности золотодобывающих компаний в различных странах мира важное место занимает развитие и обучение своего персонала. Так, в среднем на работника предприятия в год приходится около 30 часов технической подготовки.

Поддержка местных сообществ

Важнейшее значение в деятельности современной золотодобывающей компании играет получение и поддержка социальной лицензии на добычу. Социальная лицензия налагает на предприятие обязательства по существенному инвестированию в улучшение

социально-экономической жизни местного сообщества. На рис. 5.10 представлена диаграмма, в которой указаны основные сферы инвестиций золотодобывающих компаний в местные сообщества. В целом, в приоритете золотодобывающих предприятий находятся вопросы здравоохранения.

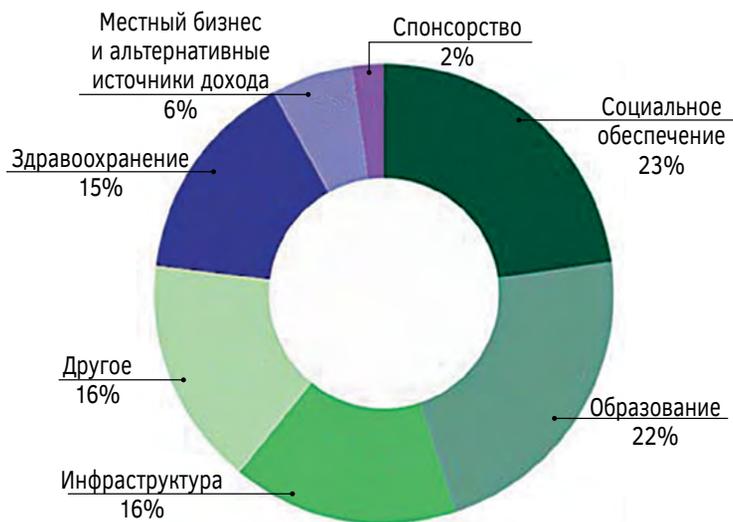


Рис. 5.10. Инвестиционные затраты золотодобывающих компаний в различные социально-экономические сферы жизни местного сообщества

Основные области применения драгоценных металлов

В условиях произошедшей демонетизации драгоценные металлы выполняют двойную функцию:

- с одной стороны, слитки и монеты из драгоценных металлов являются объектом банковского и биржевого оборота, входят в состав государственных и международных золотовалютных резервов и тезаврационных фондов, выступают важнейшим ресурсом, способным обеспечить экономический и финансовый потенциал государства-производителя, гарантировать стабильность банка, а также благосостояние отдельного человека. Основой мировой финансовой системы на данный момент является американский доллар, обеспеченный всеми активами США, в том числе и самыми большими в мире золотыми резервами, что объясняет стремление как государств, так и частных владельцев поддерживать золотые активы в высоколиквидном состоянии. Многие страны постоянно котируют стоимость национальных золотых запасов в соответствии с мировыми ценами;
- с другой стороны, драгоценные металлы остаются важнейшим видом военно-стратегического и промышленного сырья, без которого невозможно функционирование предприятий ВПК, электроники, а также гражданского самолетостроения, ювелирной, автомобильной, химической промышленности и многих других отраслей народного хозяйства. Распределение драгоценных металлов по отраслям промышленности приведено на рис. 5.11. Несмотря на тот факт, что индустриальные державы активно финансируют программы поиска технологий, направленных на минимизацию использования драгоценных металлов, уменьшение их промышленного потребления не наблюдается.

С конца XX в. золото, серебро, платина и палладий становятся цифровыми деньгами для проведения платежей и расчетов с помощью электронных систем. Такое решение приняли разработчики глобальных компьютерных финансовых систем, опираясь на довод: компьютерная валюта должна быть независима от тенденций национальных экономик. В настоящее время функционируют четыре системы цифрового золота: e-gold, DigiGold, GoldMoney и E-dinar, обороты которых составляют миллиарды долларов США.

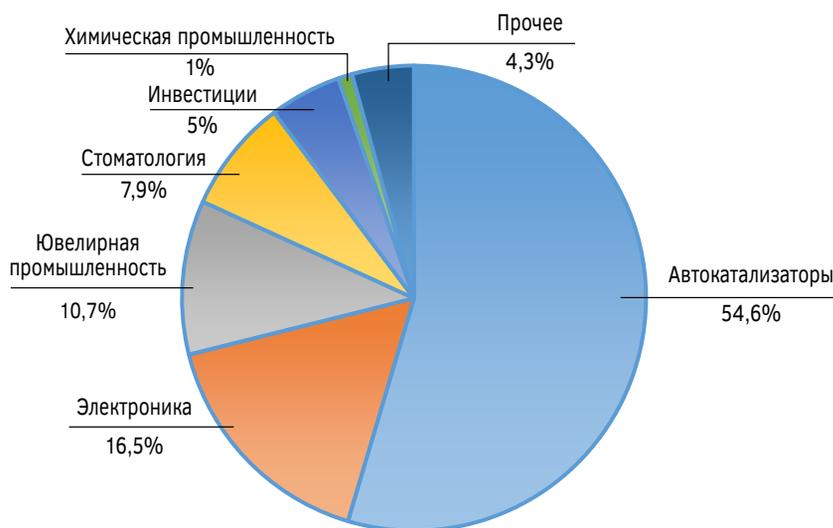


Рис. 5.11. Применение драгоценных металлов в промышленности

Однако пользователями данных систем являются пока только частные лица, в будущем предполагается привлечь и центральные банки, которые обладают значительными объемами запасов золота.

В периоды кризисов, политических и экономических неурядиц драгоценные металлы способны выполнять функцию чрезвычайных мировых денег. Это подтверждает тот факт, что значительная часть золота (около 22% от общего объема, добытого за всю историю человечества, что составляет почти 33 тыс. т) продолжает храниться в государственных резервах многих стран.

Возможность сохранения денежных функций драгоценными металлами обусловлена, прежде всего, их естественными природными свойствами, ограниченностью и редкостью нахождения в природе, а также трудностью их добычи.

В настоящее время драгоценные металлы являются объектом купли-продажи на международных и внутренних товарных и финансовых рынках, а также первичного и вторичного, биржевого и внебиржевого рынков. Торги по золоту, серебру, платине и палладию проводятся ежедневно, а в средствах массовой информации также ежедневно публикуются текущие котировки на металлы. Мировые цены на драгоценные металлы по сложившимся десятилетиями традициям устанавливаются в долларах США в расчете за тройскую унцию (31,1 г), а внутренние цены — в национальной валюте. Динамика цен на драгоценные металлы приведена на рис. 5.12.



Рис. 5.12. Динамика цен на драгоценные металлы

ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ

Применяемые для добычи драгоценных металлов технологии должны обеспечивать рентабельное производство при рациональном использовании природных ресурсов и допустимом техногенном воздействии на окружающую среду. В настоящее время все чаще наблюдается вовлечение в переработку руд низкого качества, содержащих металл в труднодоступном («упорном») виде, требующем применения особых методов переработки. Эти факторы не способствуют снижению себестоимости добычи. Появление новых месторождений, масштабных, с высоким содержанием легкодобываемых металлов маловероятно. Для сохранения конкурентоспособности российской отрасли добычи драгоценных металлов необходимо применение высокоэффективных, но в то же время малозатратных технологий. Технологии, реализация которых позволит улучшить технико-экономические показатели процесса добычи драгоценных металлов, повысить эффективность охраны окружающей среды, рассмотрены ниже.

Обжиг мышьяковистых концентратов с последующим цианированием

Обжиг мышьяковистых концентратов с последующим цианированием огарка. Технология включает в себя измельчение до крупности минус 0,1–1 мм и гравитационно-флотационное обогащение золотосульфидных руд с получением золото-мышьяковистых концентратов с содержанием золота не менее 30 г/т, окислительный обжиг концентратов при температуре 350–800°С с очисткой пылегазовых выбросов, цианирование огарка, обезвреживание цианистых отходов.

Цианирование медистых руд

Цианирование медистых руд (либо продуктов обогащения) с кондиционированием хвостовых растворов. Технология включает в себя измельчение руды до крупности минус 0,1 мм (обогащение), цианирование измельченного продукта в агитационном сорбционном режиме при концентрации NaCN 0,2–3 г/л, фильтрацию хвостов цианирования до остаточной влажности кека 10–30%, складирование кека в полусухое хвостохранилище, кондиционирование цианистых фильтратов с регенерацией NaCN и возврат кондиционированных растворов и регенерированного NaCN в технологический цикл предприятия.

Тиокарбамидное выщелачивание концентратов

Тиокарбамидное выщелачивание богатых золото- и серебросодержащих концентратов. Технология включает в себя фильтрационное выщелачивание богатых (содержание серебра не менее 5 кг/т) золото-серебряных концентратов растворами с концентрацией тиокарбамида 10–20 г/т и серной кислоты 5–10 г/л, электролитическое осаждение драгоценных металлов из фильтратов, обратное использование обезметалленных растворов в цикле выщелачивания.

Цианирование золотосодержащих хвостов обогащения полиметаллических руд

Технология включает в себя цианирование хвостов обогащения крупностью минус 0,1 мм в агитационном режиме при малой концентрации NaCN 0,01–0,05 г/л, минимизирующей нецелевой расход NaCN на растворение примесей, со складированием пульпы в наливное хвостохранилище (без обезвреживания).

Обезвреживание от токсичных соединений озоном

Обезвреживание цианидсодержащих сточных вод и хвостовых пульп озоном от токсичных соединений, включая цианиды, тиоцианаты, металлы, органические соединения.

Ионообменная очистка шахтных и карьерных вод

Ионообменная очистка шахтных и карьерных вод от токсичных примесей, включая тяжелые металлы, для подготовки их к сбросу в природные водоемы.

Кондиционирование технологических растворов и оборотных вод с использованием озона

Кондиционирование технологических растворов и оборотных вод с использованием процесса озонирования с целью регенерации свободного цианида и удаления примесей, мешающих извлечению драгоценных металлов.

Значительный прорыв в использовании метода биовыщелачивания руд драгметаллов должна обеспечить возможность применения этой технологии в холодном климате под открытым небом, в режиме кучного или кюветного выщелачивания. Аналогичные процессы разработаны для никелевых и медных сульфидных руд, и их применение на золото-сульфидных рудах, видимо, не будет иметь радикальных отличий, хотя и потребует специального подбора экономичных и эффективных реагентов — растворителей золота.

Еще одним потенциально весьма перспективным методом может стать сочетание автоклавного и бактериального выщелачивания — с использованием бактерий, которые могут жить под высоким давлением и аналоги которых обитают в подводных вулканах Мирового океана на большой глубине.

Основными тенденциями в производстве горного оборудования на ближайшие несколько лет останутся разработка и внедрение новых технологий с ориентиром на автоматизацию и роботизацию; на защиту окружающей среды, в частности, сокращение выбросов CO₂ за счет перехода на использование техники на электроприводе, а также гибридные решения; безопасность — самого оборудования и работников. Конечной же целью развития по всем перечисленным направлениям является повышение эффективности, производительности и, следовательно, экономичности горных работ и рентабельности предприятия в целом.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Алексеев, Г. В.* Арктическое пространство России в XXI веке: факторы развития, организация управления / Г. В. Алексеев, С. К. Антипов, А. И. Афоничкин, Е. А. Афоничкина и др. ; под ред. В. В. Ивантера. — СПб. : Наука, 2016. — С. 538–553.
2. *Аман, И. П.* Открытая разработка месторождений / И. П. Аман. — Пермь : ПГТУ, 2005. — 84 с.
3. *Андреев, Б. Н.* Открыто-подземная разработка рудных месторождений / Б. Н. Андреев, И. Н. Ошмянский, А. Д. Черных. — Киев : Техника, 2010. — 520 с.
4. *Арсентьев, А. И.* Разработка месторождений твердых полезных ископаемых открытым способом / А. И. Арсентьев. — СПб. : Санкт-Петербургский горный институт, 2009. — 136 с.
5. *Баликов, С. В.* Золото: Геологические аспекты / С. В. Баликов, В. Е. Дементьев. — Иркутск : ОАО «Иргиредмет», 2015. — 414 с.
6. *Баликов, С. В.* Золото: Свойства. Геохимические аспекты / С. В. Баликов, В. Е. Дементьев. — Иркутск : ОАО «Иргиредмет», 2015. — 327 с.
7. Геолого-промышленные типы месторождений золота // Вестник золотопромышленника : отраслевой портал агентства «Прайм». — <https://archivegold.1prime.ru/gold/info/info04.asp> (дата обращения: 23.10.2019). — Загл. с экрана.
8. *Голик, В. И.* Специальные способы разработки месторождений / В. И. Голик. — М. : Инфра-М, 2014. — 131 с.
9. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2011 году» / Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. — М., 2012. — 333 с.
10. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2015 году» / Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. — М., 2016. — 341 с.
11. *Дмитрак, Ю. В.* АО «Ведущий проектно-исследовательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии» — путь длиной в 65 лет / Ю. В. Дмитрак, Е. Н. Камнев // Горный журнал. — 2016. — № 3. — С. 6–12.
12. *Дружинин, А. В.* Основные типы промышленных месторождений серебра / А. В. Дружинин, Е. В. Карелина // Вестник РУДН. Сер. Инженерные исследования. — 2008. — № 1. — С. 35–41.

13. *Дудинский, Ф. В.* Определение основных параметров открытой разработки месторождений с горизонтальным и пологим залеганием пласта / Ф. В. Дудинский, К. Б. Нечаев // Вестник ИРГТУ. — 2014. — № 11 (94). — С. 122–127.
14. *Евдокимов, С. И.* Повышение извлечения золота на основе совместной переработки руды и отходов / С. И. Евдокимов, В. С. Евдокимов // ФТПРРМПИ. — 2017 — № 2. — С. 154–160.
15. ИТС 23–2017. Добыча и обогащение руд цветных металлов / Росстандарт. — М. : Бюро НДТ, 2017. — 336 с.
16. ИТС 49–2017. Добыча драгоценных металлов / Росстандарт. — М. : Бюро НДТ, 2017. — 143 с.
17. *Каплунов, Д. Р.* Комбинированная разработка рудных месторождений / Д. Р. Каплунов, М. В. Рыльникова. — М. : Горная книга, 2012. — 344 с.
18. *Каплунов, Д. Р.* Научно-методические основы проектирования экологически сбалансированного цикла комплексного освоения и сохранения недр Земли / Д. Р. Каплунов, М. В. Рыльникова, Д. Н. Радченко // ГИАБ. Вып. 3 : Условия устойчивого функционирования минерально-сырьевого комплекса России. — 2015. — № 4 (спец. вып. 15). — С. 5–11.
19. *Комогорцев, Б. В.* Проблемы переработки бедных и упорных золотосодержащих руд / Б. В. Комогорцев, А. А. Вареничев // ГИАБ. — 2016. — № 2. — С. 204–218.
20. *Костромин, М. В.* Проблемы дражной разработки континентальных россыпей / М. В. Костромин, Г. А. Юргенсон, С. Г. Ползутко. — Новосибирск : Наука, 2007. — 180 с.
21. *Костромин, М. В.* Эксплуатационные потери песков в межшаговых и межходовых целиках при дражной разработке россыпей / М. В. Костромин, Д. М. Грешилов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2012. — № 8. — С. 80–87.
22. *Костромитинов, К. Н.* Оценка эффективности отработки месторождений драгоценных металлов / К. Н. Костромитинов, В. М. Лысков. — Иркутск : Изд-во БГУЭП, 2015. — 530 с.
23. *Котляр, Ю. А.* Металлургия благородных металлов / Ю. А. Котляр, М. А. Меретуков. — М. : АСМИ, 2002. — 466 с.
24. *Кривенко, А. П.* Типы месторождений, запасы, добыча и рынок платиновых металлов / А. П. Кривенко, А. И. Глотов // Вестник МГТУ. — 2000. — № 2 (3).
25. *Лунышин, П.* Золотая история планеты земля / П. Лунышин // Золото и технологии. — 2013. — № 2(20). — URL: <http://zolteh.ru/reviews/zolotaya-istoriya-planety-zemlya/> (дата обращения: 28.10.2019).
26. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации [официальный сайт]. — URL: <http://www.mnr.gov.ru/> (дата обращения: 28.10.2019).
27. Министерство финансов Российской Федерации [официальный сайт]. — URL: <http://minfin.ru> (дата обращения: 28.10.2019).
28. *Михайлов, Ю. В.* Подземная разработка месторождений полезных ископаемых / Ю. В. Михайлов. — М. : Academia, 2008. — 320 с.
29. Подземное и кучное выщелачивание урана, золота и других металлов : в 2 т. / под ред. М. И. Фазлуллина. — М. : ИД «Руда и Металлы», 2005.
30. *Ракишев, Б. Р.* Комплексное использование руды на предприятиях цветной металлургии Казахстана // Горный журнал. — 2013. — № 7.
31. *Секисов, А. Г.* Перспективы использования шахтного выщелачивания при разработке золоторудных месторождений / А. Г. Секисов, Ю. С. Шевченко, А. Ю. Лавров // ФТПРРМПИ. — 2016. — № 1. — С. 110–116.
32. Справочник по разработке россыпей / под общ. ред. В. П. Березина, В. Г. Лешкова, Л. П. Мацуева, С. В. Потемкина. — М. : Недрa, 1973. — 502 с.
33. Стратегия развития арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 г. — М., 2010.
34. *Фоменко, А. А.* Использование техногенных скоплений и забалансовых руд цветных металлов в контексте экономики природопользования / А. А. Фоменко // Горный журнал. — 2013. — № 2.
35. *Чернявский, А. Г.* О геолого-экономической и стоимостной оценке объектов твердых полезных ископаемых / А. Г. Чернявский // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. — 2013. — № 2. — С. 19–26.
36. *Talgamer, B. L.* The nature protection technology of dragging / B. L. Talgamer, D. E. Machno // 8th International IAEG Congress, Rotterdam, 2000. — Rotterdam : Balkema, 2000. — P. 4363–4365.
37. U. S. Geological Survey [Official Web-site]. — URL: <http://www.usgs.gov> (accessed: 28.10.2019).
38. *Yurgenson, G. A.* Geotechnogenesis problems / G. A. Yurgenson // Journal of Geosciences. — 2004. — Vol. 7 (1). — P. 92–96.

Часть вторая

**РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ
ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВ**



ПЕРЕРАБОТКА УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ

Константин Игоревич Дементьев

Ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН,
зав. сектором, кандидат химических наук

Александр Юрьевич Попов

Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики»,
старший научный сотрудник, кандидат химических наук

ВВЕДЕНИЕ

Условия для существования и возможности развития современной цивилизации определяет энергопотребление¹. Основными источниками энергии в настоящее время являются природные горючие ископаемые: нефть, природный газ, уголь, а также атомная энергия и энергия течения речных вод. Несмотря на то, что все большее значение приобретают альтернативные источники энергии, наибольшая доля в мировом энергобалансе последние 50 лет принадлежит нефти и природному газу, причем доля последнего в мировом топливно-энергетическом балансе непрерывно возрастает.

Благодаря высокому удельному энергосодержанию, широкому спектру получаемых продуктов и развитию технологий обеспечивается высокая рентабельность при добыче, транспортировке и переработке нефти. Сегодня переработка углеводородного сырья представляет собой одну из самых высокотехнологичных и наукоемких отраслей экономики. Суммарная мировая мощность нефтеперерабатывающих заводов составляет более 4,8 млрд т нефти в год, в том числе в России — 325 млн т.² Мировая мощность газоперерабатывающих заводов составляет 2,6 трлн м³, в том числе в России — 109,2 млрд м³.³

Нефть представляет собой богатый источник разнообразных продуктов: различных видов топлив, смазочных материалов, битумов, сырья для производства пластмасс, синтетического каучука, моющих средств, растворителей. На раннем этапе развития нефтяной отрасли переработка нефти ограничивалась примитивной кубовой перегонкой, при которой из нефти методом постепенного испарения выделяли осветительный керосин. Современные *нефте*-перерабатывающие заводы представляют собой совокупность объектов общезаводского хозяйства и технологических установок, предназначенных для получения широкого спектра нефтепродуктов путем осуществления разнообразных физических и химических процессов в широком диапазоне температур и давлений, как правило, в присутствии катализаторов. Основной задачей нефтепереработки является производство товарных нефтепродуктов в соответствии с требуемым уровнем качества при минимальном негативном воздействии на окружающую среду и здоровье человека. Решение этой задачи достигается непрерывным совершенствованием технологических процессов нефтепереработки. На современных *газо*-перерабатывающих заводах получают следующие товарные продукты: сухой отбензиненный газ, этановая фракция, сжиженные углеводородные газы, стабильный конденсат и продукты его переработки, сера или серная кислота, гелий, технический углерод, котельное топливо. Отдельно производят сжиженный природный газ. На некоторых заводах организовано

¹ Капица С. П. Общая теория роста человечества. — М., 2009. — 120 с.

² BP Statistical Review of World Energy. — June 2018. — URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf> (accessed: 20.05.2019).

³ Ким Ю С. Сланцевая революция // Химический журнал. — 2014. — № 4. — С. 28.

газохимическое производство синтетических моторных топлив, метанола, диметилового эфира, oleфинов и других нефтепродуктов.

ИСТОРИЯ ЗАРОЖДЕНИЯ НЕФТЕГАЗОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Начало современной истории развития нефтедобычи и нефтепереработки принято связывать с серединой XIX в. В то время, когда основным ископаемым сырьем был уголь, в 1846 г. канадским исследователем Авраамом Геснером был изобретен способ получения из него жидкого топлива, которое можно было применять для освещения⁴. Полученный продукт, названный Геснером керосином, горел, не давая копоть, и был более дешевым аналогом животных осветительных масел (например, ворвани), которые все сложнее было добывать в больших количествах. Уже в 1847 г. шотландский химик Джеймс Юнг получил аналогичный продукт при дистилляции жидкого углеводородного сырья, просачивающегося из угольных залежей⁵. В результате этих открытий были организованы частные предприятия по производству осветительного керосина, но глобальный интерес к добыче и переработке нефти возник позже. Важным событием в истории использования нефти является успех компании «Пенсильвания Рок Ойл Компани», а конкретно ее проекта по бурению скважины для добычи нефти в штате Пенсильвания (США). Под руководством американца Эдвина Дрейка в 1859 г. в Тайтусвилле по опыту соледобытчиков с помощью парового двигателя была пробурена первая нефтяная скважина⁶. До этого времени нефть собирали в тех небольших количествах, которое просачивалось из пород, выкапывая вручную «нефтяные колодцы», или собирали ветошь с нефтяных пятен на поверхности воды⁷.

Зарождение нефтеперерабатывающей промышленности в России

Зарождение нефтяного дела в России связано с еще более ранней датой, когда в 1745–1746 гг. купцом Федором Прядуновым был организован нефтяной промысел на нефтяном ключе на реке Ухте в Пустозерском уезде. В соответствии с предписанием Берг-коллегии добытая нефть доставлялась в Москву, где позже «двоилась» (перегонялась). Тем не менее суровые климатические условия района нефтедобычи делали транспортировку ухтинской нефти в Москву невероятно сложным и затратным предприятием, низкий спрос мешал наладить сбыт. Вдобавок, уничтожение промысла стихией привело к полному разорению купца Прядунова⁸.

Первая промышленная установка перегонки нефти была сооружена в 1823 г. братьями Дубиниными на Северном Кавказе в ауле Акки-Юрт вблизи Моздока. Установка производительностью несколько десятков тонн керосина в год представляла собой кирпичную печь с железным кубом объемом около 500 л, накрытым медной крышкой, от которой отходила медная трубка, пропущенная через деревянную бочку с водой. По сохранившимся чертежам и описанию процесса установлено, что процесс перегонки в кубе Дубининых длился 5–7 часов⁹. Получаемый из грозненской нефти дистиллят поступал в продажу как готовый освети-

⁴ Murray T. J. Dr Abraham Gesner: the father of the petroleum industry // Journal of the Royal Society of Medicine. — 1993. — V. 86, № 1. — P. 43–44.

⁵ Russell L. S. A heritage of light. — Toronto : University of Toronto Press, 2002. — 344 p.

⁶ Owen E. W. Trek of the Oil Finders: A History of Exploration for Petroleum // The American Association of Petroleum Geologists. — January 1, 1975. — 1647 p.

⁷ Ергин Д. Добыча. Всемирная история борьбы за нефть, деньги и власть : пер. с англ. — 2-е изд. — М. : ДеНово, 2001.

⁸ Фукс И., Матишев В. Нефтяная колыбель России // Нефть России. — 1995. — № 7–8.

⁹ Дорогочинский А. З., Суманов В. Т. Изобретение крепостных крестьян братьев Дубининых (история зарождения нефтеперерабатывающей промышленности). — Грозный : Чечено-Ингушское книжное изд-во, 1973. — 70 с.

тельный материал на Нижегородскую ярмарку и в Москву, а остаток продавался на Кавказе как смазочный материал¹⁰. Предприятие Дубининых проработало до 1847 г., однако, несмотря на его громадное значение, серьезно не повлияло на развитие нефтяной промышленности.

По проекту горного инженера Н. И. Воскобойникова в 1837 г. в Баку (Балаханы) был построен опытный завод, на котором впервые в мире была применена перегонка нефти с водяным паром, а для подогрева нефти в кубах использовался природный газ¹¹.

В 1860 г. в Баку (Сураханы) Закаспийским торговым товариществом, учрежденным известным российским промышленником В. А. Кокоревым, был построен завод по получению осветительных масел по образцу заводов Германии, где в качестве сырья использовали сланцы. Изначально технологическая схема завода предполагала переработку битуминозного сырья «кира» в чугунных ретортах с последующей дистилляцией жидких продуктов в шарообразных котлах. Аппараты доставлялись из-за границы морским, речным и наземным путем. Позже завод перешел на выпуск осветительных материалов из нефти, и процесс перегонки осуществлялся с использованием трех железных котлов емкостью около 2 м³ каждый. Перегонка продолжалась в течение 3 суток. Нагревание нефти в шарообразных котлах происходило неравномерно, поэтому эта форма была заменена на цилиндрическую, сначала с плоским дном, а затем с выгнутым. Для охлаждения продуктовой парогазовой смеси использовали трубчатый холодильник, состоящий из деревянного чана с холодной водой, в который были помещены две металлические коробки, соединенные между собой 30 вертикально стоящими металлическими трубами. Парогазовая смесь поступала из котла в верхнюю коробку, конденсат стекал в нижнюю коробку, откуда вытекал в приемник. В холодильнике такой конструкции конденсация паров происходила не вполне эффективно: пары, вырвавшись из трубки холодильника, воспламенялись на воздухе. После нескольких пожаров трубчатый холодильник заменили другим, представляющим собой железный усеченный конус с двойными стенками и змеевиком, помещенный в деревянный чан. Технологическая схема производства включала стадию очистки. Первоначально продукт очищали только гидроксидом натрия в примитивном аппарате с ручным перемешивающим устройством. В дальнейшем при очистке использовали серную кислоту и более совершенную аппаратуру с паровым приводом. Над совершенствованием технологического процесса Сураханского завода работал доцент кафедры химии Императорского Санкт-Петербургского университета (в настоящее время СПбГУ) Д. И. Менделеев¹².

В 1864 г. вблизи Грозненских нефтяных колодцев введен в эксплуатацию нефтеперегонный завод по производству керосина, построенный купцом И. М. Мирзоевым по проекту Джевата Меликова, имевшего опыт строительства установок перегонки нефти в Баку. Технологическая схема завода включала вертикальные котлы с огневым подогревом, холодильники из деревянных емкостей с железными змеевиками, приемники. За 30 лет существования завод подвергался многочисленным реконструкциям и модернизации¹³.

За последующие 10 лет число керосиновых заводов в Баку увеличилось до 100 с суммарной мощностью более 65 тыс. т нефти в год, а затем снизилось до 20, после чего возросло до 200 по причине колебаний цен на нефть, керосин и введения акцизной пошлины¹⁴. К концу 1860-х гг. нефтеперегонные заводы работали в Одессе, Керчи, Темрюке, Тамани, Херсоне,

¹⁰ Гулишамбаров С. И. Материалы для производства фотогенового производства // Горный журнал. — 1880. — Т. 4, № 10–11. — С. 327.

¹¹ Карпов В. П., Гаврилова Н. Ю. Очерки истории отечественной нефтяной и газовой промышленности. — Тюмень : ТюмГНГУ, 2002. — 172 с.

¹² Кокорев В. А. Экономические провалы. — М. : Директ-Медиа, 2014. — 267 с.

¹³ Менделеев Д. И. Нефтяная промышленность в Северо-Американском штате Пенсильвания и на Кавказе. — СПб. : Тип. т-ва «Обществ. польза», 1877.

¹⁴ Тридцать лет деятельности «Товарищества нефтяного производства братьев Нобель». 1879–1909. — СПб., 1914.

Терской области. Следует отметить, что в то время легкие (бензиновые) фракции и тяжелый остаток (мазут) не находили квалифицированного применения и сжигались в мазутных ямах.

В 1876 г. в Нижегородской губернии инженером-технологом и предпринимателем В. И. Рагозиным был построен нефтеперерабатывающий завод, выпускающий высококачественные нефтяные минеральные масла методом перегонки в вакууме или в присутствии водяного пара, разработанным Д. И. Менделеевым¹⁵.

В этом же году инженер В. Г. Шухов, будучи студентом Императорского Московского технического училища (в настоящее время МГТУ им. Н. Э. Баумана), разработал паровую форсунку для сжигания жидкого топлива¹⁶. Изобретение получило широкое распространение, позволив применять в качестве топлива мазут, ранее считавшийся отходом нефтепереработки. В 1879 г. основано «Товарищество нефтяного производства братьев Нобель», ставшее крупной российской нефтяной компанией, создавшей собственную транспортную и сбытовую сеть, включавшую нефтепроводы, танкеры, вагоны-цистерны и нефтебазы с причалами и железнодорожными ветками¹⁷.

Зарождение нефтеперерабатывающей промышленности в мире

В США первый нефтеперерабатывающий завод, производящий осветительный керосин, был построен Самуэлем Киром в 1853 г. в Питтсбурге¹⁸. В 1859 г. на этом заводе была переработана первая партия нефти из скважины Эдвина Дрейка. Описанные в литературе XIX в.¹⁹ процессы и аппараты для переработки нефти в целом аналогичны технологиям, применявшимся на заводах по получению осветительных масел в Баку. Развитие автомобильного и авиастроения, металлургии, энергетики вызвало спрос на моторные топлива, смазочные масла, кокс, битум, котельные топлива, побудивший развитие технологий производства этих нефтепродуктов, прежде всего в США и Европе.

Зарождение газоперерабатывающей промышленности в России

Впервые природный газ для технологических целей был применен в 1837 г. в Баку, где, по проекту горного инженера Н. И. Воскобойникова, был построен опытный завод, на котором для нагревания перегонных кубов в качестве топлива использовался природный газ. В 60-е гг. XIX в. на нефтеперегонном заводе В. А. Кокорева природный газ применялся как для нагрева сырья, так и для освещения жилых и производственных зданий.

Регулирование добычи природного газа было впервые законодательно закреплено в 1907 г. Положением Совета Министров № 53 ст. 334 «О разрешении нефтепромышленникам, получившим в пределах Апшеронского полуострова, на основании временных правил 14 мая 1900 г., участки под разведку и добычу нефти, заниматься на сих участках добычей также и углеводородного газа»²⁰.

В 1924 г. в Грозном пущен абсорбционный газолиновый завод, на котором из попутного нефтяного газа получали газовый бензин. К 1930 г. на Северном Кавказе работало 5 газолиновых заводов суммарной мощностью более 200 млн м³/год. Развитие технологий

¹⁵ *Гараевская И. А.* Русский нефтепромышленник Виктор Иванович Рагозин // Нефтяное хозяйство. — 1999. — № 4.

¹⁶ *Лескова Н.* Человек-фабрика // Наука и жизнь. — 2013. — № 12. — С. 96–109.

¹⁷ *Шилов А. В.* Товарищество нефтяного производства братьев Нобель и становление системы нефтепродуктообеспечения на Урале // Вестник Пермского ун-та. Серия: История. — 2005. — № 5. — С. 108–114.

¹⁸ *Greater Pittsburgh and Allegheny County, past, present, future / American Manufacturer and Iron World.* — Pittsburgh, 1901.

¹⁹ *Wright W.* The Oil Regions of Pennsylvania. — New York : Harper & Brothers, 1865.

²⁰ Горный журнал. — 1908. — Т. 2, № 6. — С. 87.

извлечения газового бензина из попутного нефтяного газа шло по пути от компримирования с водяным охлаждением и сепарацией до масляной абсорбции.

В 1930 г. в Майкопе был построен сажевый завод мощностью 425 тыс. т/год. Майкопский завод имел 20 камер сжигания, в качестве сырья использовался попутный нефтяной газ.

В 1932 г. на территории Мельниковского газового месторождения сооружена опытная гелиевая установка.

В 40-е гг. во время Великой Отечественной войны в Коми было эвакуировано майкопское сажевое производство, которое легло в основу первого современного российского газоперерабатывающего завода — Сосногорского ГПЗ. В связи с увеличением потребности в моторных топливах возникла тенденция совершенствования процессов газопереработки и более глубокого извлечения пропана, бутанов и газового бензина.

С 50-х гг. развитие газопереработки пошло по двум самостоятельным направлениям: переработка природного газа и газового конденсата и переработка попутного нефтяного газа.

Зарождение газоперерабатывающей промышленности в мире

Начало мировой истории развития технологий переработки углеводородных газов связано с появлением задачи утилизации больших объемов попутных нефтяных газов в связи с бурным ростом нефтяной промышленности в США в 20-х гг. XX в. Первым циклом развития мировой газопереработки являлось строительство газобензиновых заводов. За последующий столетний период мировая газоперерабатывающая промышленность прошла несколько циклов развития технологий от извлечения из природного и попутного нефтяного газа бензиновых фракций, сжиженных газов, этановой фракции, гелия до современных наукоемких газохимических процессов.

ЦИКЛЫ РАЗВИТИЯ ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ

Циклы развития нефтеперерабатывающей промышленности

Начало следующего цикла развития нефтепереработки вызвано изобретением двигателя внутреннего сгорания и появлением автомобилестроения в конце XIX — начале XX в. Появление нового рынка топлива для внедряемых двигателей — бензина — обеспечило бурный рост нефтяной промышленности. Если раньше сырая нефть подвергалась только атмосферной перегонке с отделением керосина, а бензин был ненужным побочным продуктом, который уничтожали, то теперь бензин стал целевым продуктом, а роль осветительного керосина стала неуклонно снижаться²¹. Возрастающая потребность в новом нефтяном продукте привела к необходимости создания новых способов переработки нефти. Такими процессами стали вакуумная перегонка нефти и термический крекинг. Термический крекинг нефтяных фракций (обычно тяжелого остатка вакуумной перегонки нефти — гудрона) проводился при температурах до 500°С и давлениях до 3 МПа с получением легких продуктов, в частности бензина, в результате разрыва С-С связей молекул углеводородов. Применялся также процесс так называемого висбрекинга (от *англ.* viscosity breaker), предназначенный для снижения вязкости тяжелого остатка для последующего использования, например, в качестве котельного топлива. Стоит отметить, что первый патент от 1891 г., заложивший основные технические решения процесса термического крекинга, принадлежит русским инженерам В. Г. Шухову и С. П. Гаврилову. Однако промышленного применения патент в то время не получил, в связи с отсутствующим пока еще спросом на бензин. В США в связи с бурным

²¹ Moseley C. G. Eugene Houdry, catalytic cracking and World War II aviation gasoline // J. Chem. Educ. — 1984. — V. 61. — P. 655.

развитием автомобильной промышленности в 1913 г. был разработан и запатентован аналогичный процесс термического крекинга нефти под давлением с получением бензина, названный по имени автора «процесс Бартона»²². В Советском Союзе первые импортные крекинг-установки стали применяться с 1928 г. Развитие ранних технологий производства бензина сопровождалось разработкой методов оценки его свойств, например, детонационной стойкости — октанового числа, и созданием добавок, повышающих октановое число — тетраэтилсвинца. На то время октановые числа производимых бензинов достигали значения 70 пунктов (далее — п.)²³. Еще более резко потребность в бензине возросло перед Первой мировой войной в связи с развитием авиации.

Развитие двигателей внутреннего сгорания в связи с конкуренцией производителей автомобилей, появление более продвинутых авиационных двигателей привели к повышению требований по детонационной стойкости бензина, закрепленных в 1940-х гг.²⁴ Прямогонный бензин и бензин термического крекинга уже не могли удовлетворять по качеству выросшим требованиям, и разработка методов получения высокооктановых химически стабильных бензинов стала насущной необходимостью. С конца 30-х гг. XX в. в нефтеперерабатывающую промышленность активно внедряются каталитические процессы. Из них наибольшее распространение получил каталитический крекинг. Идея применения катализаторов для осуществления крекинга в более мягких температурных условиях, чем чисто термическим путем, возникла давно. Известны, например, работы академика Н. Д. Зелинского в России и инженера МакАфи в США, которые в качестве катализатора применяли безводный хлорид алюминия; на основе этих работ еще в 1919–1920 гг. была создана опытная установка по получению бензина в очень мягких условиях, при температурном режиме примерно 200°С²⁵. Однако процесс сопровождался большими потерями катализатора вследствие образования его комплексных соединений с углеводородами и, кроме того, характеризовался длительным временем реакции. Указанные недостатки явились препятствием для промышленного внедрения. Промышленный процесс каталитического крекинга разработан французским инженером Э. Гудри в 1933 г. и внедрен в конце 30-х — начале 40-х гг. В этом процессе превращение нефтяного сырья осуществлялось при температурах 430–480°С в неподвижном слое катализатора, в качестве которого в данном цикле использовали природные глины, по химическому составу являющимися алюмосиликатами. Глины перед применением обрабатывались серной кислотой²⁶. В 1937 г. компания «Сан Ойл» строит установку каталитического крекинга с неподвижным слоем катализатора на заводе в штате Пенсильвания. Несколькими годами позже были введены в эксплуатацию более совершенные установки с движущимся слоем катализатора (технологии «Thermofor catalytic cracking» и «Houdryflow catalytic cracking» 1942 г., отечественная установка 43–102 «ГрозНИИ» 1946 г. и другие)²⁷. Работы Гудри и других исследователей дали громадный импульс технологии нефтепереработки. Процесс каталитического крекинга позволял получать более 30% бензина из керосино-газойлевой фракции, причем бензин характеризовался более высокой детонационной стойкостью и химической стабильностью, полностью удовлетворяя требованиям авиационных двигателей того времени. Каталитический крекинг сыграл ключевую роль во время Второй мировой войны, обеспечив массовое производство высокооктанового авиационного топлива²⁸.

²² Giddens P. H. Standard Oil Company (Indiana): Oil Pioneer of the Middle West. — 1955. — 741 p.

²³ Забрянский Е. И., Зарубин А. П. Детонационная стойкость и воспламеняемость моторных топлив (методы определения). — М.: Химия, 1974.

²⁴ Owen E. W. Trek of the Oil Finders: A History of Exploration for Petroleum.

²⁵ Buonora P. T. Almer McDuffie McAfee (1886–1972): Commercial catalytic cracking pioneer // Bull. Hist. Chem. — 1998. — Vol. 21. — P. 12.

²⁶ Oil and Gas Journal Annual Refiling Surveys 1950–1959.

²⁷ Encyclopedia of Chemical Processing and Design. — Vol. 13 : Cracking, Catalytic to Crystallization / Ed. J. J. McKetta Jr. — Marcel Dekker, Inc., 1981. — 408 p.

²⁸ Агафонов А. Ф., Соскин Д. М., Абаева Б. Т. Опыт эксплуатации и пути реконструкции установок каталитического крекинга с шариковым катализатором // ХТТМ. — 1959. — № 4.

Дальнейшая история процесса насыщена модификациями и улучшениями, ни один процесс в нефтепереработке не претерпел столь значительных изменений от момента создания и до сегодняшнего дня. Одним из ключевых событий, которое привело к революции в технологии каталитического крекинга, стало открытие в 1960 г. каталитической активности синтетических цеолитов (кристаллических алюмосиликатов) и разработка на их основе высокоактивных, стабильных и селективных катализаторов крекинга. Внедрение последних, начиная с 1968 г. в США и СССР, позволило существенно увеличить выработку ценных продуктов (компонентов топлив и сырья для нефтехимии) и привело к созданию принципиально нового типа химических реакторов с восходящим потоком сырья и катализатора (лифт-реакторов)²⁹.

Разработка и промышленное внедрение процесса каталитического риформинга (переработка низкооктановых бензиновых фракций нефти в высокооктановые продукты — «риформаты») приходится примерно на тот же временной интервал, что и становление каталитического крекинга. Химизм процесса риформинга заключается в превращении циклических и линейных углеводородов в ароматические. Дегидрирование шестичленных циклоалканов с образованием ароматических продуктов в присутствии никеля и металлов платиновой группы при 300°С открыто Н. Д. Зелинским в 1911 г.³⁰ Превращение линейных алканов в ароматические открыто одновременно несколькими советскими химиками — Б. А. Казанским, Б. Л. Молдавским, Г. Д. Камушером, В. И. Каржевым и А. Ф. Платэ на катализаторах, содержащих оксид хрома и платину, при температурах 300–470°С³¹. Первая промышленная установка каталитического риформинга разработана в 1940 г. В. Хэнзелом, работавшим в компании UOP (Universal Oil Products), с использованием платиносодержащего катализатора. В годы Второй мировой войны получаемый продукт активно использовался в качестве компонента авиационного бензина. В 1949 г. процесс риформинга компании UOP был модернизирован и получил название «платформинг»³². Процесс протекал при 450°С и повышенном давлении 5–6 МПа в реакторе с неподвижным слоем катализатора и позволял получать бензин с октановым числом до 100 п. В последующие годы нефтяными компаниями (Chevron, ExxonMobil, BP, UOP) было разработано множество модификаций процесса, включая создание новых катализаторов.

Другими процессами, первоначально возникшими для удовлетворения высокого спроса на высокооктановый бензин, являются изомеризация углеводородов и алкилирование — присоединение алкенов к насыщаемым и ароматическим углеводородам. Процесс изомеризации преследовал цель увеличения числа разветвленных соединений в легчайших бензиновых фракциях. Реакция алкилирования изобутана алкенами изучена в 1932 г. русским химиком, работавшим на территории США и в результате внесшим крупнейший вклад в американскую нефтехимию, В. Н. Ипатьевым, использовавшим в качестве катализатора хлорид алюминия³³. В промышленность процесс алкилирования был внедрен с применением серной кислоты (введены в конце 1930-х гг.) и позднее фтористого водорода (в 1942 г.) в качестве катализаторов. Интенсивное развитие нефтехимического синтеза с начала 1950-х гг. изменило приоритеты получения продуктов нефтепереработки: если ранее единственной целью было получение компонентов моторных топлив, то теперь актуальным стало получение сырья для последующих нужд химического синтеза. Так, термический крекинг стал применяться для

²⁹ Крекинг нефтяных фракций на цеолитсодержащих катализаторах / под ред. С. Н. Хаджиева. — М. : Химия, 1982. — 280 с.

³⁰ Казанский Б. А., Несмеянов А. Н., Платэ А. Ф. Работы академика Н. Д. Зелинского и его школы в области химии углеводородов и органического катализа // Ученые записки МГУ. — М., 1956. — Вып. 175.

³¹ Казанский Б. А. Каталитические превращения углеводородов (Сборник избранных трудов) / Б. А. Казанский. — М. : Наука, 1968. — 694 с.

³² Hansel V. U.S. Patent No. 2479110: Process of reforming a gasoline with an alumina-platinum-halogen catalyst. — Patented August 16, 1949. — URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/0e/cd/cc/1d796d70700be8/US2479110.pdf> (accessed: 20.11.2019).

³³ Ипатьев В. Н. Каталитические реакции при высоких температурах и давлениях : 1900–1933. — М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1936. — 774 с.

получения сажевого сырья и α -олефинов для производства масел; каталитический риформинг стал средством получения индивидуальных ароматических углеводородов (бензола, толуола, ксилолов); алкилирование бензола олефинами — для получения кумола (для последующего производства фенола и ацетона) и этилбензола (для получения стирола, ценного мономера).

Во второй половине XX в. по мере увеличения объемов добычи нефти возрастает доля низкокачественной тяжелой и сернистой нефти. Переработка такого сырья вызывает трудности, связанные с низким выходом и качеством получаемых продуктов, а также коррозией аппаратуры. Необходимость доведения нефтяного сырья до должного качества привела к широкому развитию гидрогенизационных или термогидрокаталитических процессов. Эти технологии переработки нефтяного сырья подразумевают повышенную температуру и давление в среде водорода и присутствие катализатора. С 1959 г. на нефтеперерабатывающих заводах появляется процесс гидрокрекинга, позволивший достаточно экономично получать из низкокачественного тяжелого нефтяного сырья дизельные и реактивные топлива, бензин и малосернистое котельное топливо³⁴.

На конец XX — начало XXI в. технологии нефтепереработки представляют собой целый комплекс различных процессов, в том числе и специфических, не описанных здесь подробно процессов коксования, производства битумов, масел и смазочных материалов, гидроочистки сырья, а также модификации стандартных процессов. Также современный нефтеперерабатывающий завод должен обеспечивать гибкость производства, чтобы соответствовать постоянно изменяющемуся рынку углеводородного сырья и продуктов. Так, например, отказ от тетраэтилсвинца в качестве высокооктановой добавки к бензину, инициированный в 1975 г., поставил перед необходимостью производства дополнительного количества высокооктановых компонентов топлива за счет более эффективного производства риформата и продуктов изомеризации, а также бутиленов для синтеза менее токсичных октановых добавок (метил-трет-бутиловый эфир (МТБЭ), этил-трет-бутиловый эфир (ЭТБЭ) и пр.). Развивающаяся полимерная промышленность стала причиной неуклонно растущего спроса на мономеры — низкомолекулярные олефины, что поставило перед нефтепереработкой задачу максимизации получения из нефти этилена, пропилена и бутиленов, что было достигнуто с помощью процесса пиролиза углеводородов и модификацией режима каталитического крекинга.

При этом целью современного нефтяного завода является достижение максимальной глубины переработки нефти, другими словами, максимальное извлечение широкого спектра ценных продуктов и минимизация полученного малоценного остатка (топочного мазута), а не получение исключительно бензина, как это было около ста лет назад. В наше время пальма первенства по средней в стране достигнутой глубине переработки нефти принадлежит США, существенно опережающими Россию. Отставание отечественной нефтепереработки связывают с тяжелым периодом развала Советского Союза, после которого Российской Федерации достались морально и физически устаревшие заводы, а подавляющее большинство новых заводов, построенных СССР в 1970–1980-е гг., располагалось в союзных республиках³⁵. Тем не менее в России отмечается рост глубины переработки нефтяного сырья, и значительные средства выделяются на реконструкцию существующих и создание новых установок.

Исторический цикл развития нефтеперерабатывающей промышленности, включающий научно-технический, технико-экономический, экономически-социальный и социально-регуляторный этапы, хорошо просматривается на примере поступательных изменений в технологии производства автомобильных бензинов и последовательного ужесточения регулирующих требований к их характеристикам (рис. 6.1). Если принять за исходный ориентир сложившуюся в первые десятилетия XX в. ситуацию, когда с увеличением мощности и топливной экономичности двигателей внутреннего сгорания возникла задача получения

³⁴ Scherzer J., Gruia A. J. Hydrocracking Science and Technology. — New York ; Basel : CRC Press, 1996. — 305 p.

³⁵ Капустин В. М. Проблемы развития нефтепереработки в России // Нефть и капитал [сайт]. — URL: http://www.oilcapital.ru/technologies/2006/10/061059_98699.shtml (дата обращения: 20.05.2019).

высокооктанового топлива, которая была решена путем применения в качестве антидетонационной добавки тетраэтилсвинца (ТЭС), то следующий этап включал широкое применение ТЭС при производстве бензинов, получивших название «этилированные», что вызвало значительный технико-экономический эффект. Однако в связи с тем, что свинец не участвует в природном круговороте веществ и аккумулируется в биосфере, а сам ТЭС является нейротоксичным ядом и канцерогеном, в течение третьего этапа происходило накопление и изучение данных о негативном воздействии продуктов сгорания ТЭС на здоровье человека и окружающую среду, а также привлекалось внимание общественности к этой проблеме. Кроме того, использование этилированных бензинов приводило к выходу из строя системы нейтрализации отработанных газов автомобиля. Заключительный этап цикла пришелся на период 70–90-х гг. и соответствовал поэтапному запрету этилированных автомобильных бензинов в большинстве стран мира. Запрет ТЭС привел к первому этапу нового цикла развития технологии производства бензинов, включающего поиск путей возмещения объемов производства высокооктановых компонентов топлив. Эта проблема была решена путем ввода новых мощностей вторичных процессов нефтепереработки и применения новых высокоэффективных антидетонационных присадок, добавок и компонентов, прежде всего метил-трет-бутилового эфира. Широкое применение бензинов, содержащих МТБЭ, позволило существенно повысить мощностные, экономические и экологические характеристики двигателей внутреннего сгорания. Однако в 2000-е гг. в США было обнаружено наличие МТБЭ в источниках водоснабжения в результате утечек бензина из подземных резервуаров и попадания эфира в водозаборные скважины, что привело к началу поэтапного запрета продажи бензина, содержащего МТБЭ. В настоящее время использование МТБЭ в качестве компонента автомобильного бензина полностью прекращено в США и ограничено в Канаде, Японии и ряде стран Евросоюза, что соответствует четвертому социально-регуляторному этапу.

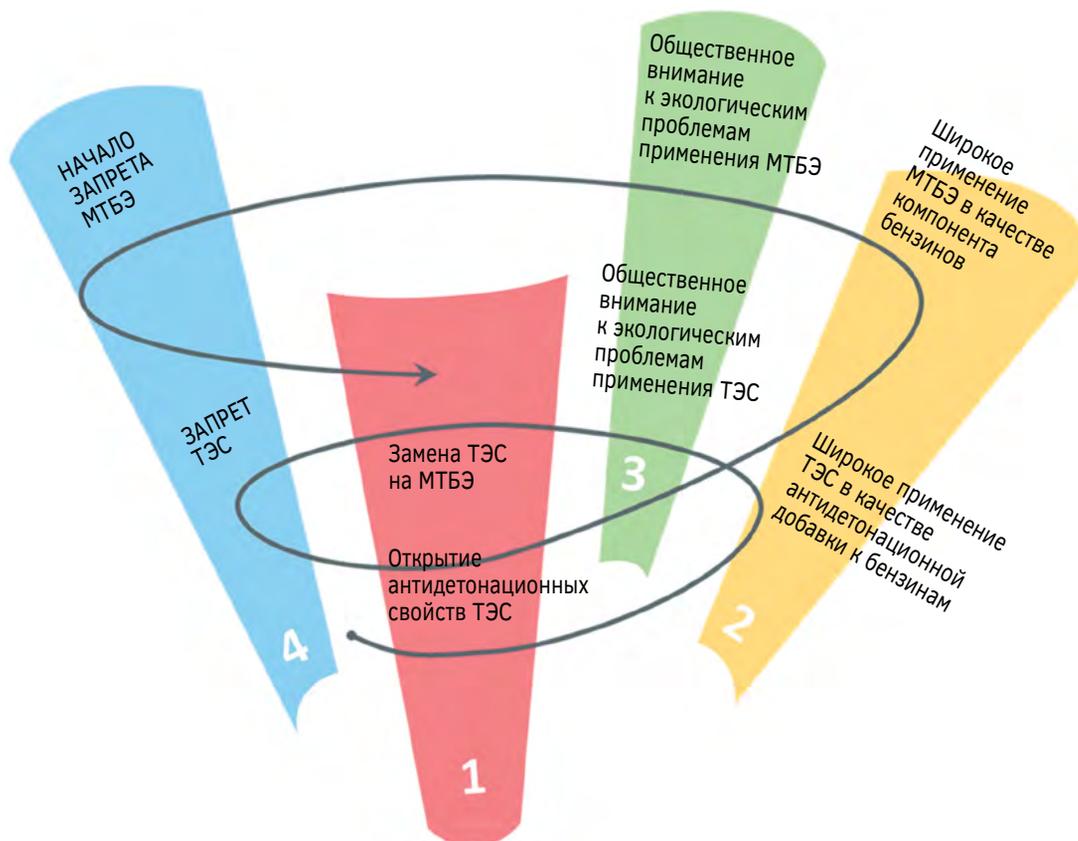


Рис. 6.1. Эволюция технологий производства высокооктановых автомобильных бензинов:

- 1 — научно-технический этап; 2 — технико-экономический этап;
3 — экономически-социальный этап; 4 — социально-регуляторный этап

Циклы развития газоперерабатывающей промышленности

Переход газопереработки на новый цикл развития после так называемой «эры газового бензина» сформировался в середине 50-х гг. Этот период, когда с освоением месторождений Волго-Уральской нефтегазоносной области газопереработка выделилась в два самостоятельных направления (переработка природного и попутного нефтяного газов), назван «эрой сжиженных газов». Централизованная переработка попутного нефтяного газа в России началась в 1956 г. с пуском первых очередей Миннибаевского и Туймазинского заводов в республиках Татарстан и Башкортостан. К задачам газопереработки, помимо получения газового бензина, добавились подготовка газа к транспортированию, а также производство сжиженных газов, серы. В целях извлечения из газа жидких углеводородов и влаги была разработана технология низкотемпературной сепарации газа методом однократной конденсации при температурах от -10 до -25°C с применением ингибиторов гидратообразования.

Развитие нефтехимической промышленности привело к резкому увеличению потребности в этане и развитию технологий его извлечения на газоперерабатывающих заводах, период 60–70-х гг. получил название «эра этана». Для увеличения степени извлечения из сырьевого газа этана — ценного пиролизного сырья — был осуществлен переход на низкотемпературные процессы: низкотемпературную абсорбцию и низкотемпературную конденсацию. В этот период введены в эксплуатацию ГПЗ, перерабатывающие попутный нефтяной газ в Поволжье (Нефтегорский, Отраденский, Коробковский), в Предуралье (Пермский, Шкаповский), на Северном Кавказе (Грозненский, Нефтекумский, Вознесенский).

В 1970–1980-е гг. прослеживается переход газовой отрасли к наиболее полному и квалифицированному использованию всех компонентов сырьевого газа. При освоении нефтяных месторождений Тюменской области построены Нижневартовский, Сургутский, Белозерный, Губкинский, Муравленковский, Локосовский, Красноленинский ГПЗ в Западной Сибири. С вводом в эксплуатацию Оренбургского серогазоконденсатного месторождения и пуском Оренбургского ГПЗ в 1974 г. началась крупнотоннажная переработка природного газа. В настоящее время Оренбургский комплекс включает три очереди газопереработки по 15 млрд $\text{м}^3/\text{год}$, а также единственный на сегодняшний день в России гелиевый завод. В 1986 г. введен в эксплуатацию Астраханский ГПЗ, перерабатывающий 12 млрд м^3 высокосернистого природного газа и 3 млн т газового конденсата в год. Перед газоперерабатывающими предприятиями были поставлены новые задачи по подготовке газа к транспортированию, которые уже невозможно было решить с использованием традиционных на тот период низкотемпературных процессов. Были внедрены новые технологии гликолевой и адсорбционной осушки газов. Товарная продукция ГПЗ включала подготовленный к транспортированию газ высокого давления, широкую фракцию углеводородных газов, стабильный конденсат, сжиженные газы, гелий, серу.

В 90-е гг. пущен Зайковский ГПЗ в Оренбургской области, построены промысловые установки по переработке попутного нефтяного газа на месторождениях.

Самым новым газоперерабатывающим предприятием России является Южно-Приобский ГПЗ в Тюменской области, введенный в эксплуатацию в 2015 г.

В последние десятилетия наблюдается увеличение доли сжиженного природного газа в мировом объеме потребления природного газа и рост мощностей производства СПГ. В настоящее время СПГ производится более чем в 15 странах, включая Россию. Технология сжижения природного газа основана на многоступенчатом сжатии с охлаждением с использованием дроссельных, турбодетандерных, турбинно-вихревых установок. Важным направлением развития переработки газа является внедрение газохимических процессов, в том числе технологий GTL, позволяющих получать из природного и попутного нефтяного газа синтетическое топливо, метанол, диметиловый эфир, синтетическую нефть. Строящийся

Амурский газоперерабатывающий завод проектной мощностью 42 млрд м³ природного газа в год станет крупнейшим в России и вторым по мощности в мире предприятием.

Таким образом, в развитии технологий газопереработки также прослеживаются несколько циклов, каждый из них проходит четыре этапа, которым соответствуют потребность в новом продукте, необходимость разработки или в совершенствовании технологии его получения, разработка технологии и ее внедрение и широкое распространение (рис. 6.2).

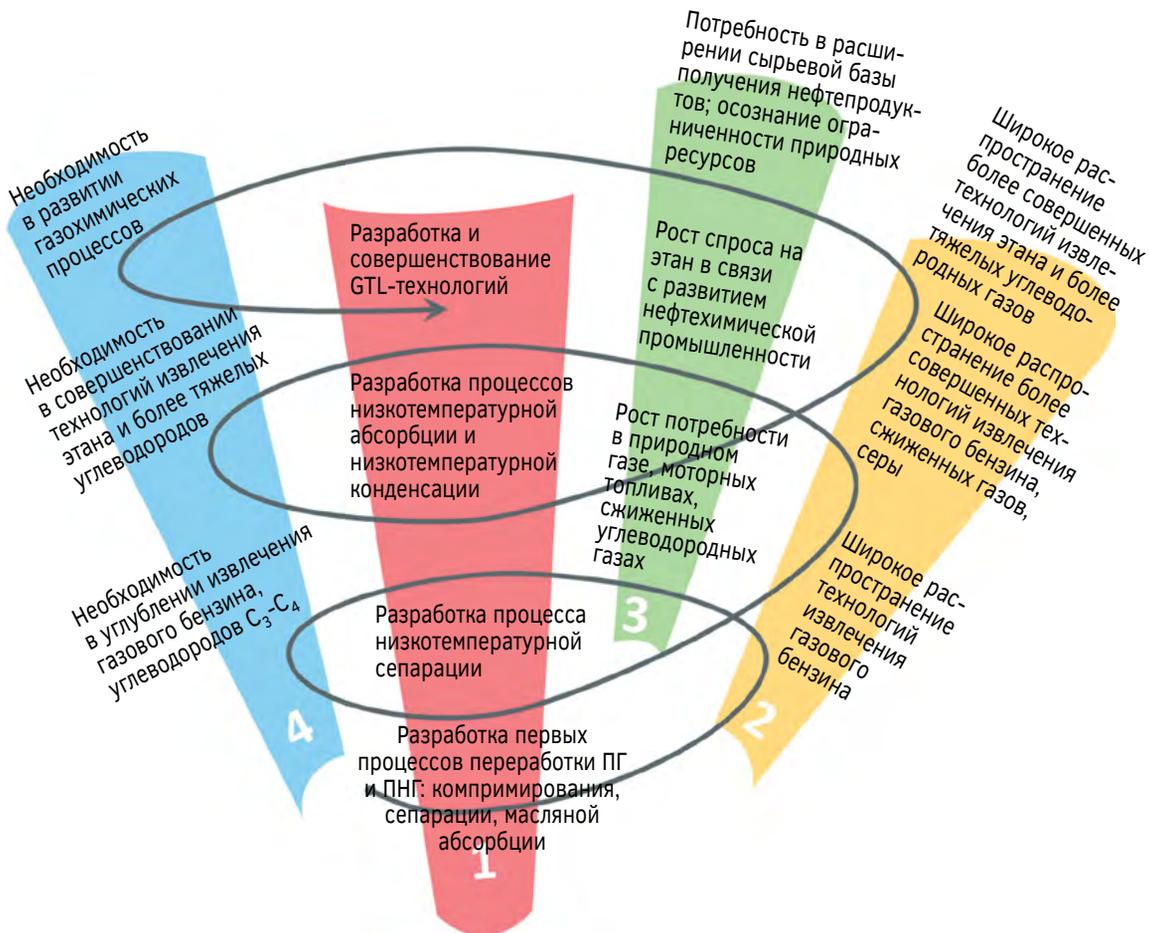


Рис. 6.2. Эволюция технологий газопереработки:

1 — научно-технический этап; 2 — технико-экономический этап;
3 — экономически-социальный этап; 4 — социально-регуляторный этап

ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ

Технологии нефтепереработки

Нефть представляет собой сложную смесь большого количества компонентов с различной молекулярной массой, кипящих в очень широком интервале температур — от 30 до 700°С. Кроме углеводородов в нефти содержатся неуглеводородные компоненты — асфальто-смолистые вещества, сернистые, азотистые и кислородсодержащие соединения. Разумеется, для эффективной переработки настолько сложной смеси компонентов применяют целый набор технологий, составляющих вместе схему комплексной переработки нефти (рис. 6.3).

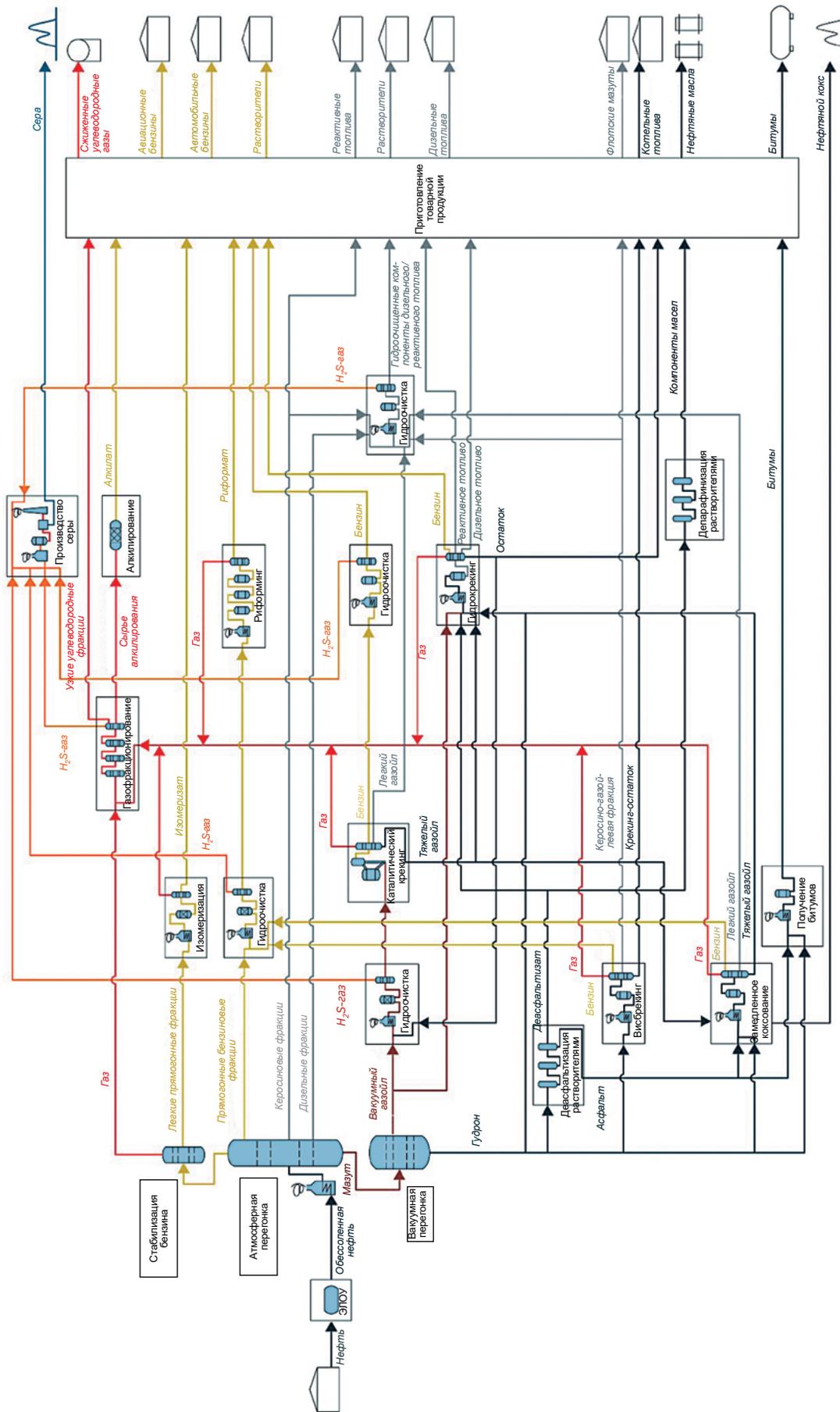


Рис. 6.3. Принципиальная схема нефтеперерабатывающего завода

Нефтяные фракции различаются между собой температурами кипения. В табл. 6.1 приведены наиболее часто используемые интервалы кипения для различных фракций.

Таблица 6.1. Температурный интервал кипения различных фракций

Фракция	Температура начала кипения, °С	Температура конца кипения, °С	Применение фракции	Содержание в нефти (примерное), %
Бензиновая	25–30	180–200	Топливо для поршневых двигателей с воспламенением от искры	15–20
Керосиновая	150–180	240–250	Топливо для турбореактивных двигателей	15–20
Дизельная	180–220 (зимняя) / 220–250 (летняя)	320–340 (зимняя) / 340–360 (летняя)	Топливо для поршневых двигателей с воспламенением от сжатия	15–20
Масляная	350–360	520–550	Сырье для производства масел и парафинов, сырье для установок глубокой переработки нефти в топлива	20–25
Гудрон	520–550		Сырье для производства масел и битумов, сырье для установок глубокой переработки нефти в топлива	20–25

Перед тем как подвергнуться переработке нефть должна быть доставлена от места добычи до завода-потребителя. Добываемая из скважин нефть содержит значительное количество растворенного в ней газа (до 300 нм³/т нефти) органического и неорганического (сероводород, углекислый газ) происхождения, а также воды (200–300 кг/т) с минеральными солями (10–15 кг/т) в виде эмульсии. Эти примеси могут стать источником проблем при транспортировке нефти: коррозия и выход из строя аппаратуры, воздушные пробки в трубопроводах в результате выделяющегося растворенного нефтяного газа. Поэтому после добычи производится подготовка нефти, включающая следующие стадии:

- 1) удаление растворенных газов (попутных нефтяных газов), называемое стабилизацией нефти;
- 2) обессоливание нефти;
- 3) обезвоживание нефти.

Стабилизация нефти заключается в десорбции растворенных в ней газов путем однократного или многократного испарения при понижении давления. В случае необходимости достижения особо низкого количества растворенных в нефти газов (менее 1,5 масс. %) применяются специальные установки стабилизации, включающие в свой состав ректификационные колонны. Обессоливание и обезвоживание нефти происходит на промышленных установках подготовки и непосредственно на нефтеперерабатывающих заводах. Для обессоливания и обезвоживания нефтяных эмульсий используются механические (отстаивание), термические (нагревание), химические (применение ПАВ, разрушающих эмульсию) и электрические методы, а также их комбинации. Электрический метод заключается в применении электротермохимического удаления солей и воды на установках электрообессоливания и обезвоживания (ЭЛОУ), где в специальных аппаратах нефтяная эмульсия подвергается воздействию переменного тока напряжением 30–45 кВ, в результате чего происходит передвижение и слипание капель воды, содержащих соли, и их отделение от нефти. После установок ЭЛОУ масса воды и растворенных в ней солей в составе нефти снижается в 8–10 раз.

После вышеописанных процессов подготовленная нефть может быть транспортирована на завод. Современные методы доставки нефти используют различные виды транспорта — трубопроводный, железнодорожный, водный и в некоторых случаях автомобильный. В России транспортировка нефти в основном осуществляется именно трубопроводным транспортом — по нефтепроводам, позволяющим снабжать большим количеством сырья отдаленные от месторождений регионы при низкой себестоимости перекачки.

Нефть, пришедшая на нефтеперерабатывающий завод, проходит дополнительную стадию обезвоживания и обессоливания. Процессы переработки нефти принято классифицировать на первичные и вторичные. Первичная переработка включает в себя физическое разделение компонентов нефти без протекания химических превращений. Сюда входят как этапы стабилизации, обезвоживания и обессоливания нефти, так и последующие атмосферная и вакуумная перегонка, вторичная перегонка бензина и дизельного топлива. Разделение нефти на фракции осуществляется с применением специальных аппаратов, называемых ректификационными колоннами, обеспечивающими эффективное и четкое разделение компонентов нефти. Перегонка нефти в настоящее время производится на так называемых трубчатых установках (соответственно, атмосферных и вакуумных). При перегонке при атмосферном давлении выделяют так называемые «светлые фракции» — бензиновую, керосиновую и дизельную. Остатком атмосферной перегонки является мазут, который при вакуумной перегонке разделяют на газойлевые фракции и гудрон в остатке.

Полученные в результате первичной переработки нефтепродукты затем могут быть направлены на другие процессы, включающие химические превращения. Совокупность этих процессов названа вторичной переработкой нефти. Методы вторичной переработки, в свою очередь, подразделяются на две большие группы: термические и термокаталитические процессы (табл. 6.2). В результате совокупность процессов первичной и вторичной переработки нефти на сегодняшний день позволяет производить широкий спектр полезных продуктов: топлив, масел и смазочных материалов, сырья для производства полимеров, синтетических нитей и тканей, одежды, даже косметических и парфюмерных товаров и многое другое.

Таблица 6.2. Методы вторичной переработки нефти, их назначение

Название процесса		Назначение
Термические процессы	Висбрекинг	Получение котельного топлива из нефтяных остатков — гудронов
	Коксование	Получение из нефтяных остатков кокса — высокоуглеродистого продукта, применяемого в металлургии, производстве электродов и в качестве топлива
	Термический крекинг	Высокотемпературная переработка тяжелых фракций нефти с целью получения компонентов топлива (на сегодняшний день практически полностью вытеснен каталитическим крекингом)
Термокаталитические процессы	Каталитический крекинг	Получение из газойлевых фракций вакуумной перегонки нефти высокооктановых компонентов бензина и моторных топлив, а также легких олефинов (этилена, пропилена, бутиленов)
	Риформинг и изомеризация	Переработка низкооктановых бензиновых фракций, полученных в других процессах, в высокооктановые
	Алкилирование	Производство высокооктановых компонентов бензина — разветвленных углеводородов — из бутана и бутилена
	Совокупность гидрогенизационных процессов	Переработка тяжелых нефтяных фракций под давлением водорода для получения дополнительного количества более легких продуктов: газойлей, топлив и газа. Также важным применением является удаление примесей серы, кислорода и азота из нефтяных фракций для получения продуктов, соответствующих современным экологическим стандартам

По совокупности сырья и получаемых продуктов в структуре нефтеперерабатывающего завода можно выделить ряд блоков (рис. 6.4).

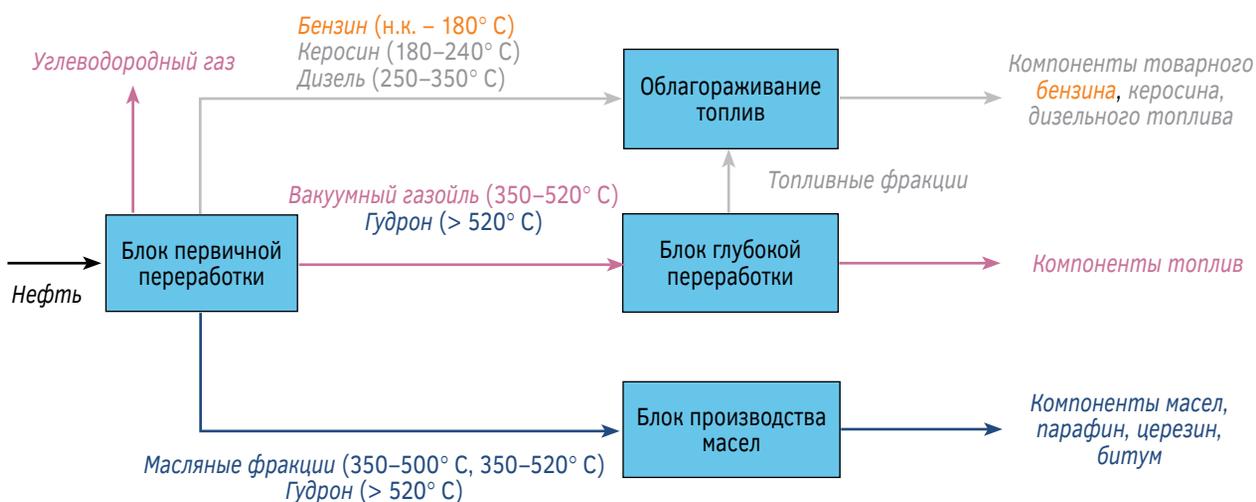


Рис. 6.4. Блочная схема нефтеперерабатывающего завода

Блок первичной переработки нефти

Поскольку к товарным нефтепродуктам (топлива, масла) предъявляются различные требования по температурам кипения, эксплуатационным свойствам, нефть на первом этапе переработки подвергают разделению на фракции (рис. 6.5).

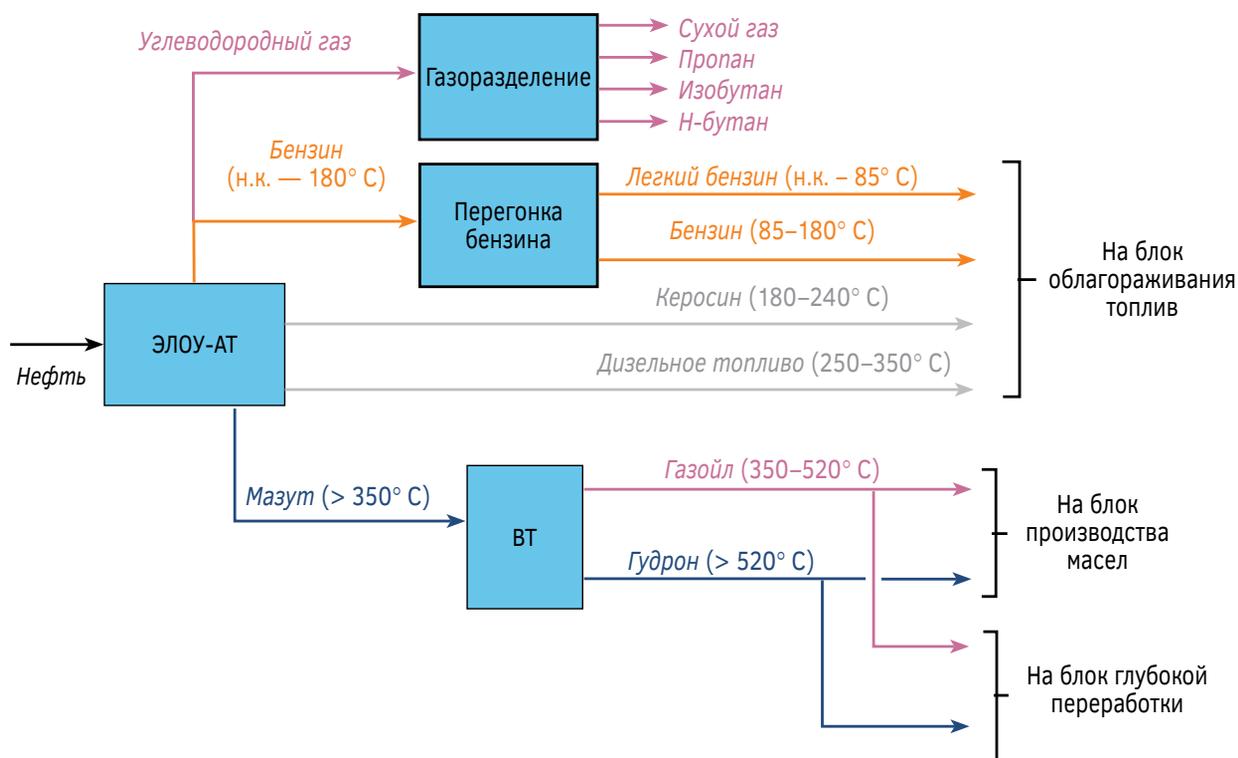


Рис. 6.5. Принципиальная схема первичной переработки нефти

Процесс первичного разделения нефти на фракции является наиболее крупнотоннажным на заводах: общая мощность установок составляет свыше 4880 млн т/год, причем доля России составляет 6,7%³⁶. Разделение нефти на фракции осуществляется ректификацией — физическим процессом, сходным с испарением. Нефть нагревается до температуры 200–240°С и поступает в специальный аппарат — ректификационную колонну, в которой содержится 15–20 специальных контактных устройств — тарелок. На каждой тарелке осуществляется интенсивный контакт между образовавшимися в результате нагрева парами и жидкостью, благодаря чему жидкость обогащается наиболее высококипящими компонентами паровой фазы, а пар — наиболее низкокипящими компонентами жидкой фазы. При наличии температурного градиента между тарелками осуществляется разделение углеводородов по высоте колонны, причем наиболее легкие фракции отбираются сверху колонны, наиболее тяжелые — снизу.

Как правило, на установках первичной перегонки нефти имеется от 2 до 4 ректификационных колонн, работающих под небольшим избыточным давлением. В наиболее часто применяемой схеме первая колонна («отбензинивающая») служит для выделения из нефти газов и основной части бензина, вторая колонна («основная») применяется для выделения из нефти оставшегося бензина, керосиновой и дизельной фракции, а третья колонна («стриппинг») играет вспомогательную роль и служит для дополнительной очистки керосиновой и дизельной фракций от легких компонентов.

Наиболее тяжелым продуктом первичной («атмосферной») перегонки является мазут — нефтяной остаток с температурой начала кипения свыше 350–360°С. Дальнейшее его разделение на фракции при атмосферном давлении невозможно, т. к. при температуре более 370°С наблюдается интенсивное разложение углеводородов нефти. Для дальнейшего разделения мазута применяются вакуумные колонны, использующие явление понижения температуры кипения при понижении внешнего давления. Современные вакуумные колонны на установках первичной переработки нефти работают при остаточном давлении 15–30 мм рт. ст. (2–4% от атмосферного). Благодаря такому низкому давлению вакуумная колонна работает в интервале температур 170–340°С, обеспечивая выделение масляной фракции, выкипающей в интервале 360–550°С (в пересчете на нормальные условия). На заводах топливного профиля выделяется одна масляная фракция, которая затем служит сырьем для процессов глубокой (деструктивной) переработки, на заводах масляного профиля вместо одной фракции выделяется 3–4 с узким интервалом температур кипения (350–400°С, 400–450°С, 450–500°С, 500–550°С). Узкие масляные фракции используются далее для производства масел и парафинов.

На установках первичной переработки нефти также выделяется углеводородный газ, содержание которого в нефти достигает 5%. Газ далее подвергается разделению в ректификационных колоннах на индивидуальные компоненты. Разделение осуществляется под давлением 1,0–2,5 МПа, что позволяет практически полностью его сжигать и обеспечить нужный температурный режим работы ректификационных колонн в интервале 25–70°С. В результате разделения из газа выделяют пропан, изобутан и бутан, которые применяются как исходное сырье для синтезов на нефтехимических заводах либо реализуются в виде сжиженного топлива для автомобилей, работающих на газе. Неразделенный газовый остаток («сухой газ»), содержащий этан и метан, используется как топливо для внутризаводских нужд.

³⁶ BP Statistical Review of World Energy. — June 2018. — URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf> (accessed: 20.05.2019).

Блок процессов облагораживания топлив

Фракции, выделяемые из нефти ректификацией при атмосферном давлении, — «прямогонные» фракции — не являются товарными продуктами. Бензиновые фракции имеют низкое октановое число (табл. 6.3), а керосиновая и дизельная фракции содержат большое количество сернистых соединений. Для доведения фракций до нужного качества применяют ряд процессов облагораживания.

Проблема низкого октанового числа прямогонного бензина заключается в его составе. Принципиально есть пять классов углеводородов, содержащихся в нефтяных фракциях — алканы линейного («нормального») строения (n-алканы), изомерные алканы (изоалканы), циклические алканы (нафтены), ароматические углеводороды и алкены (олефины). Эти углеводороды различаются по своему строению. Последний класс углеводородов содержится только в бензинах процессов глубокой переработки, а в прямогонных дистиллятах отсутствует. Все классы характеризуются своим интервалом октановых чисел (табл. 6.4), причем наиболее желательными компонентами бензинов являются изоалканы, арены и олефины.

Процессы облагораживания бензиновых фракций реализуют одну из реакций взаимного превращения классов углеводородов: изомеризация, алкилирование, риформинг (рис. 6.6).

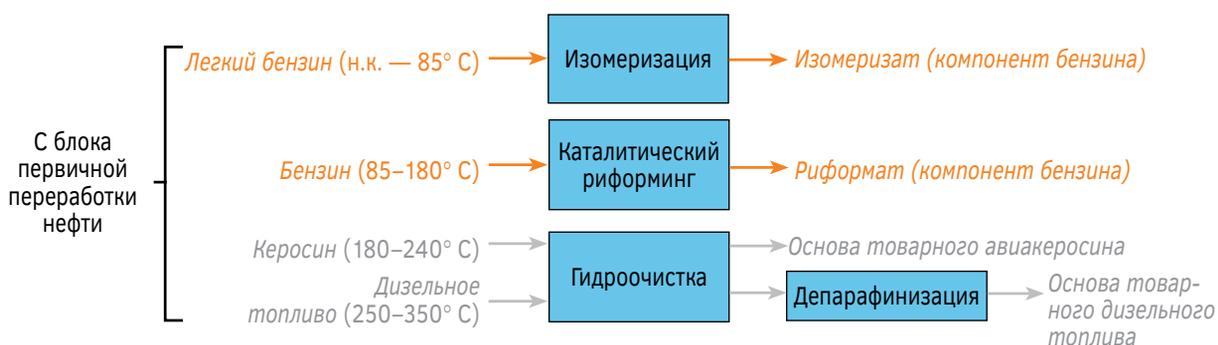


Рис. 6.6. Блок процессов облагораживания топлив

Таблица 6.3. Октановое число различных бензиновых фракций

Бензины	Моторный метод	Исследовательский метод
Прямогонные фракции:		
– НК–62°С	72–74	73–75
– НК–70°С	69–72	70–73
– 62–105°С	54–58	55–59
– НК–180°С	44–48	44–48
Катализат риформинга:		
– с периодической регенерацией	83–87	93–98
– с непрерывной регенерацией	86–90	96–100
Алкилат	90–94	91–95
Рафинат производства ароматических углеводородов	50–60	51–60
Изомеризат установок изомеризации	86–88	88–90
Бензин термокрекинга и висбрекинга	67–70	70–73
Бензин коксования	65–67	68–71
Бензин каталитического крекинга	78–82	85–92
Бензин гидрокрекинга и гидроочистки	76–78	77–79

Таблица 6.4. Октановое число различных групп углеводородов

Тип углеводородов	Октановое число	Примечания
Н-алканы	0–30	–
Изоалканы	85–100	–
Циклоалканы (нафтены)	75–85	–
Алкены (олефины)	85–95	Ухудшают стабильность топлива при хранении
Арены (ароматические углеводороды)	100–120	Вызывают повышенное нагарообразование в двигателе, выбросы канцерогенов
Простые эфиры (справочно)	110–130	–

Процесс изомеризации заключается в превращении н-алканов в изоалканы и сопровождается значительным увеличением октанового числа фракции — с 60–65 до 82–85 п. Процесс протекает в интервале температур 120–200°С, давления 2,0–4,0 МПа и является каталитическим; в качестве катализаторов применяются платиновые металлы, нанесенные на кислотный носитель (оксид алюминия, цеолиты, сульфатированные оксиды циркония). Вследствие имеющихся в настоящий момент принципиальных ограничений процесса сырьем его могут служить только легкие бензиновые фракции, содержащие углеводороды с 5 и 6 атомами углерода и выкипающие до 85°С.

Мировая мощность установок изомеризации превышает 74 млн т/год, в России функционирует 12 установок общей мощностью 0,96 млн т/год с тенденцией к расширению.

Каталитический риформинг — еще один распространенный процесс облагораживания бензиновых фракций. В нем протекают две реакции:

- дегидрирование нафтен в арены;
- дегидроциклизация н-алканов в нафтены с последующим их дегидрированием.

В результате в составе бензина снижается содержание н-алканов и нафтен и существенно возрастает доля ароматических углеводородов (до 60–65 масс. %). Октановое число бензина риформинга обычно составляет 95–97 п., а в ряде случаев может достигать 100 п. Процесс риформинга подобен процессу изомеризации, однако температура в риформинге существенно выше — 470–520°С. Кроме того, химизм процесса риформинга обуславливает образование большого количества водорода, используемого на заводах для гидрогенизационных процессов. Мощность установок риформинга в мире составляет около 600 млн т/год; в России функционирует 51 установка риформинга общей мощностью около 30 млн т/год.

Отрицательной стороной высокого содержания ароматических углеводородов является повышенная склонность к нагарообразованию у такого бензина, а также повышенный объем выбросов полиароматических углеводородов, являющихся канцерогенами. По этой причине содержание ароматических углеводородов в бензинах ограничивается на уровне 35% об.

Ряд установок риформинга как в нашей стране, так и за рубежом работают в режиме получения индивидуальных ароматических углеводородов. В этом случае установка дополняется узлом экстракции, в котором с помощью селективного экстрагента (сульфолан, этиленгликоли) выделяются ароматические углеводороды — бензол, толуол, этилбензол и ксилолы, являющиеся важнейшим нефтехимическим сырьем. Остаток от экстракции (рафинат) применяется в качестве растворителя.

Облагораживание керосиновых и дизельных фракций (средних дистиллятов) необходимо для удаления содержащихся в них сернистых соединений. Необходимость удаления серы из топлив диктуется экологическими соображениями: при сгорании в двигателе сера превращается в диоксид, который при попадании в атмосферу является причиной кислотных дождей.

Удаление серы из дистиллятов происходит в процессе гидроочистки. Гидроочистка — наиболее крупнотоннажный процесс облагораживания топлив; суммарная мировая

мощность установок гидроочистки достигает 2,3 млрд т/год. В России функционирует свыше 50 установок гидроочистки общей мощности около 108 млн т/год. В присутствии специальных катализаторов на основе алюминия, никеля, кобальта, молибдена при температуре 360–380°С и в присутствии водорода происходит разрушение сернистых и азотистых соединений, нестойких в этих условиях, с образованием углеводородов, сероводорода и аммиака. Установки гидроочистки обеспечивают остаточное содержание серы в топливах на уровне не более 0,001% (10 ppm), что удовлетворяет современным требованиям.

При необходимости производства арктического дизельного топлива с температурой застывания менее –45°С блок облагораживания дистиллятов часто дополняется также процессом депарафинизации. Снижение температуры застывания обеспечивается за счет удаления наиболее высокоплавких компонентов топлива — n-алканов. Существуют два способа удаления углеводородов данного типа из топлива — карбамидный и каталитический. В карбамидном способе топливо обрабатывается карбамидом, который образует комплексные соединения с n-алканами, легко отделяемые от топлива. Карбамидный комплекс (клатрат) после отделения разрушают с регенерацией карбамида и получением фракции жидких парафиновых углеводородов. Последние могут быть использованы для синтеза линейных α -олефинов (сырья для производства моющих средств) либо реализованы в качестве бытового топлива.

При каталитическом способе депарафинизации топливо подвергают гидрооблагораживанию в условиях, сходных с гидроочисткой, на катализаторах специального типа. При этом происходит превращение n-алканов в изоалканы с соответствующим понижением температуры застывания топлива.

Блок процессов глубокой переработки нефти

Глубина переработки нефти (а значит и коэффициент ее полезного использования) при первичной переработке обычно составляет не более 60–65%. Для увеличения глубины переработки необходимо применение целого класса процессов, позволяющих превращать тяжелые нефтяные фракции — масляные фракции, мазут, гудрон — в моторные топлива и сырье для нефтехимии. При этом применяются особые подходы для дистиллятных (масляные) и остаточных (мазут, гудрон) фракций (рис. 6.7).

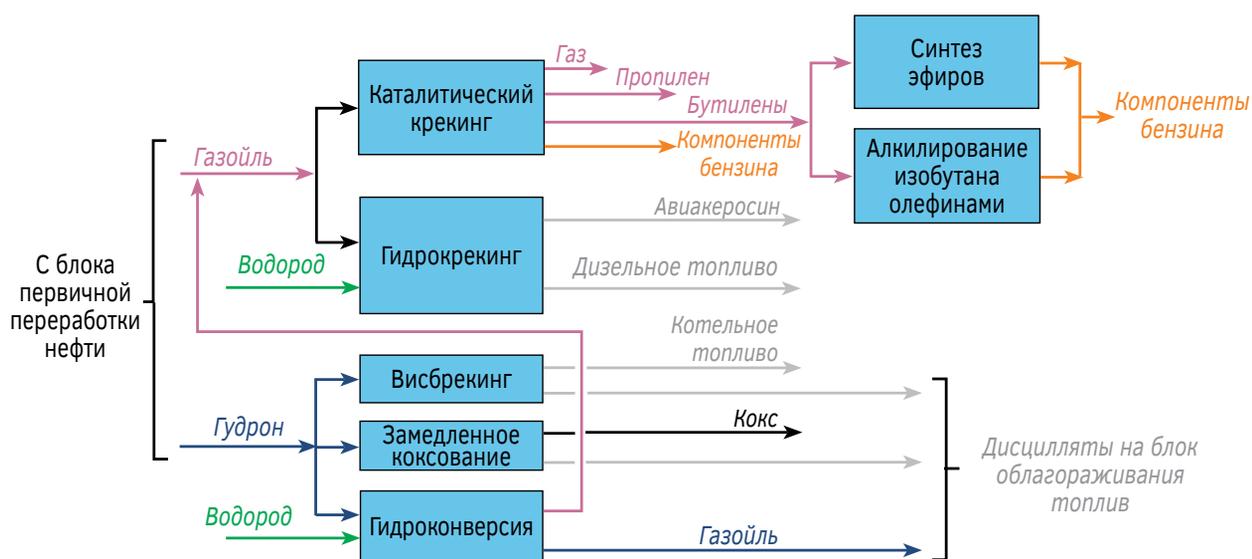


Рис. 6.7. Блок процессов глубокой переработки нефти

Для переработки дистиллятных фракций применяют каталитические процессы крекинга и гидрокрекинга. Сущность обоих процессов состоит в разрыве длинных молекул углеводородов тяжелых фракций с образованием более легких углеводородов бензинового и дизельного рядов. Катализатор, содержащий цеолиты типа Y и ZSM-5 в качестве кислотной основы, обеспечивает также протекание ряда реакций, приводящих к улучшению качества получаемых топлив — изомеризации, циклизации, дегидрирования.

Различие процессов — в их направленности. Каталитический крекинг направлен на синтез высокооктанового бензина и низших олефинов (пропилена, бутиленов), являющихся сырьем нефтехимических синтезов. Этому способствует катализатор с высоким содержанием цеолитов и высокая температура, вплоть до 540°С. В этих условиях выход олефинов составляет 12–15%, а выход бензина с октановым числом 92 п. достигает 50–55%.

Каталитический крекинг — самый распространенный процесс глубокой переработки нефти; общая мощность установок достигает 840 млн т/год; в России функционирует 25 установок общей мощностью 25 млн т/год. Существуют отдельные модификации процесса крекинга, направленные на переработку остаточного сырья или на селективный синтез легких олефинов. В последнем случае выход олефинов возрастает до 38–42% за счет уменьшения выхода бензина.

Гидрокрекинг направлен, в основном, на получение высококачественного керосина и дизельного топлива. Катализаторы гидрокрекинга, помимо кислотной основы, содержат гидрирующие компоненты, позволяющие превращать олефиновые и часть ароматических углеводородов в алканы и нафтены, соответственно, что существенно улучшает качество топлив. Процесс протекает при температуре 380–420°С и давлении 14–17 МПа в зависимости от качества сырья. Жесткие условия процесса компенсируются высоким качеством продуктов. Возможность получения авиакеросина и дизельного топлива с высокими экологическими и эксплуатационными характеристиками обуславливает широкую распространенность процесса: суммарная мощность установок гидрокрекинга вакуумного газойля составляет 277 млн т/год. В России работают 4 установки гидрокрекинга мощностью около 10 млн т/год.

Развитие технологии каталитического крекинга, повышение выхода низших олефинов обеспечили сырьевую базу для ряда процессов синтеза высокооктановых компонентов бензина. Исторически первый процесс такого рода — алкилирование изобутана бутиленами. В реакции алкилирования в присутствии кислотных катализаторов происходит соединение двух молекул с образованием изооктанов — углеводородов с очень высоким октановым числом. Бутилены для этого процесса поставляются с установок каталитического крекинга, а изобутан — с установок газоразделения в составе первичной переработки нефти.

В качестве катализаторов используются жидкие кислоты: серная и фтористоводородная. Серная кислота является дешевым и относительно безопасным катализатором, однако температура процесса в данном случае составляет –10–0°С, что вынуждает использовать холодильный цикл на установке. Кроме того, в присутствии серной кислоты образуется значительное количество кислых отходов. Фтористоводородная кислота не обладает этими недостатками, однако высокая коррозионная активность и крайняя токсичность данного катализатора приводят к необходимости использования специальных видов сталей, многократного резервирования систем безопасности, что удорожает процесс и требует обеспечения высокой культуры труда. В настоящее время проводятся интенсивные разработки по замене жидких кислот на твердые гетерогенные катализаторы на основе цеолитов.

Остаточное сырье (мазут, гудрон) требует иного подхода к глубокой переработке. Традиционно используются термические процессы — висбрекинг, замедленное коксование. Висбрекинг представляет собой процесс термической обработки остатков при температуре 440–500°С в течение 5–30 минут. При этом происходит частичное расщепление углеводородных компонентов гудрона, что приводит к снижению его вязкости и возможности дальнейшего использования в качестве компонента котельного топлива. Замедленное

коксование подобно висбрекингу, однако протекает при более высоких температурах (490–520°С) и значительно большем времени реакции, которое достигает суток. За счет этого удастся намного повысить степень превращения сырья и получить большее количество легких дистиллятов. Основным продуктом в процессе замедленного коксования является кокс, выход которого составляет до 35–40%. Кокс может быть использован как топливо или, в случае применения специальных видов сырья, как материал для изготовления электродов для алюминиевой промышленности. Дистилляты, получаемые в процессах висбрекинга и коксования, имеют низкое качество и невысокую термическую стабильность, поэтому их подвергают гидрооблагораживанию.

Развитие каталитических процессов глубокой переработки нефтяных остатков (гидроконверсия) сдерживается жесткими условиями процесса, малым временем работы используемых катализаторов и невысокой достигаемой степенью превращения — около 60–65%. В последнее время наметился прорыв в области гидроконверсии вследствие разработки наноразмерных катализаторов нового типа, диспергируемых непосредственно в реакционной среде. Использование такого подхода позволяет проводить процесс в мягких условиях — температура 420–440°С, давление 5–7 МПа. Степень превращения гудрона превышает 90%; в качестве продуктов получают дистилляты, по составу и качеству подобные прямогонным дистиллятам, что позволяет проводить их переработку на существующих установках: бензин и средние дистилляты направляются на установки облагораживания топлив, а вакуумная фракция — в процесс крекинга или гидрокрекинга.

Блок процессов производства масел

Смазочные масла — важнейший продукт современной нефтепереработки. Мировой спрос на смазочные масла составляет 35–37 млн т/год. Масляные фракции на первом этапе облагораживания подвергают селективной очистке (рис. 6.8). Цель очистки — удаление полициклических ароматических углеводородов, смолисто-асфальтеновых веществ из масла, имеющих низкий индекс вязкости и ухудшающих термическую стабильность масла. Очистка производится путем экстракции данных компонентов селективным растворителем, в качестве которого в настоящее время применяют N-метилпирролидон. Выделяемый концентрат (экстракт) используется в качестве сырья для производства технического углерода, битумов либо как компонент котельного топлива. Целевой продукт — рафинат — направляется далее в процесс депарафинизации.

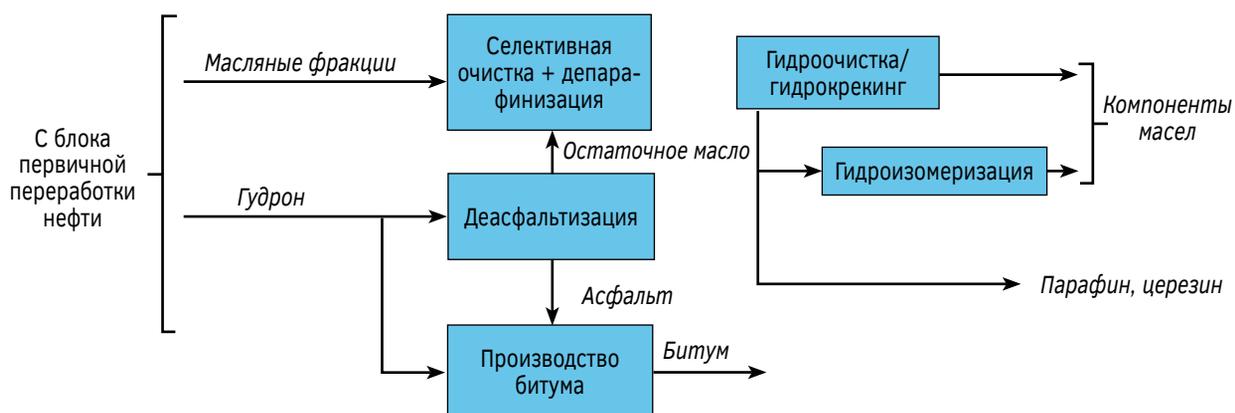


Рис. 6.8. Блок процессов производства масел

Назначение процесса депарафинизации масел, как и в случае топлив, состоит в снижении температуры застывания, что позволяет расширить температурный диапазон работы

масла. В случае масел депарафинизация осуществляется чаще всего низкотемпературным способом. Масло смешивается с легкокипящим растворителем (смеси метилэтилкетон-толуол либо ацетон-толуол), после чего охлаждается до минус 35–45°С. В результате происходит кристаллизация n-алканов C₂₀–C₃₀, выделяемых из масла на специальных барабанных фильтрах. Депарафинированное масло поступает далее на финальную очистку, а парафин (концентрат n-алканов) после обезмасливания используется как товарный продукт.

Последний этап очистки масел и парафинов — гидрооблагораживание. Масла подвергаются гидроочистке, парафин — гидроизомеризации. В результате гидроочистки у масла улучшается цвет, значительно снижается содержание серы, азота и коксообразующих компонентов. В процессе гидроизомеризации парафинов на специальных катализаторах на основе сульфидов вольфрама протекает частичная изомеризация n-алканов в изоалканы, что позволяет получить из парафина дополнительное количество высокоиндексного масла и дизельного топлива.

Наиболее тяжелая фракция, получаемая при первичной переработке нефти — вакуумный остаток (гудрон), — также является сырьем масляного производства, т. к. она содержит до 40% тяжелых углеводородов.

Выделение этих углеводородов производится в процессе деасфальтизации, суть которого состоит в экстракции углеводородов жидким пропаном. В результате выделяются деасфальтизат, служащий основой для производства остаточных промышленных масел, и асфальт — сырье для производства битума. Деасфальтизат далее подвергается очистке по схеме, аналогичной таковой для дистиллятных масляных фракций.

Производство битумов может быть реализовано двумя способами: глубоким отгоном масляных фракций из гудрона (остаточные битумы) либо окислением остаточных фракций кислородом воздуха — асфальтов, крекинг-остатков, экстрактов селективной очистки масел и их смесей (окисленные битумы). Кроме того, используют и компаундирование битумов, полученных с помощью разных процессов. Наиболее распространенный способ — продувка воздухом при температуре 180–300°С, в результате чего получается окисленный битум. Повсеместная распространенность такого битума определяется экономичностью аппаратов непрерывного действия, участвующих в процессе производства.

Технологии газопереработки

Современная газопереработка имеет следующие цели:

- доведение основной части газа до состояния, обеспечивающего возможность его экономичного транспорта на дальние расстояния до потребителей;
- удаление из сырьевого газа и утилизация кислых газов, паров воды, механических примесей, углеводородного конденсата;
- извлечение ценных углеводородов C₂–C₅ и более тяжелых бензиновых фракций, а также гелия.

Перечисленные цели достигаются применением в технологии газопереработки ряда процессов: физических (охлаждение, фильтрование), физико-химических (ректификация, абсорбция, адсорбция), химических (каталитическая очистка, окислительная конверсия сероводорода).

Сухой отбензиненный газ (СОГ, компримированный природный газ, основным компонентом которого является метан) — газ, направляемый на транспортирование по магистральным трубопроводам.

Широкая фракция легких углеводородов (ШФЛУ) — смесь углеводородов C₃–C₆ — является сырьем для получения сжиженных углеводородных газов и нефтехимического производства.

Этановая фракция является ценным сырьем установок пиролиза или дегидрирования, на которых получают этилен — ценный базовый полупродукт нефтехимического производства.

Сжиженные углеводородные газы (СУГ, СНГ — сжиженный нефтяной газ, LPG — liquefied petroleum gas) — смесь пропана и бутанов, применяется в качестве газомоторного топлива, бытового топлива, сырья нефтехимического производства.

Стабильный газовый конденсат представляет собой аналог нефти и направляется на производство компонентов моторных топлив или продуктов нефтехимии.

Товарную серу выпускают в комовом, жидком, формованном виде и реализуют производителям серной кислоты, сероуглерода, целлюлозно-бумажной продукции, фармацевтических товаров.

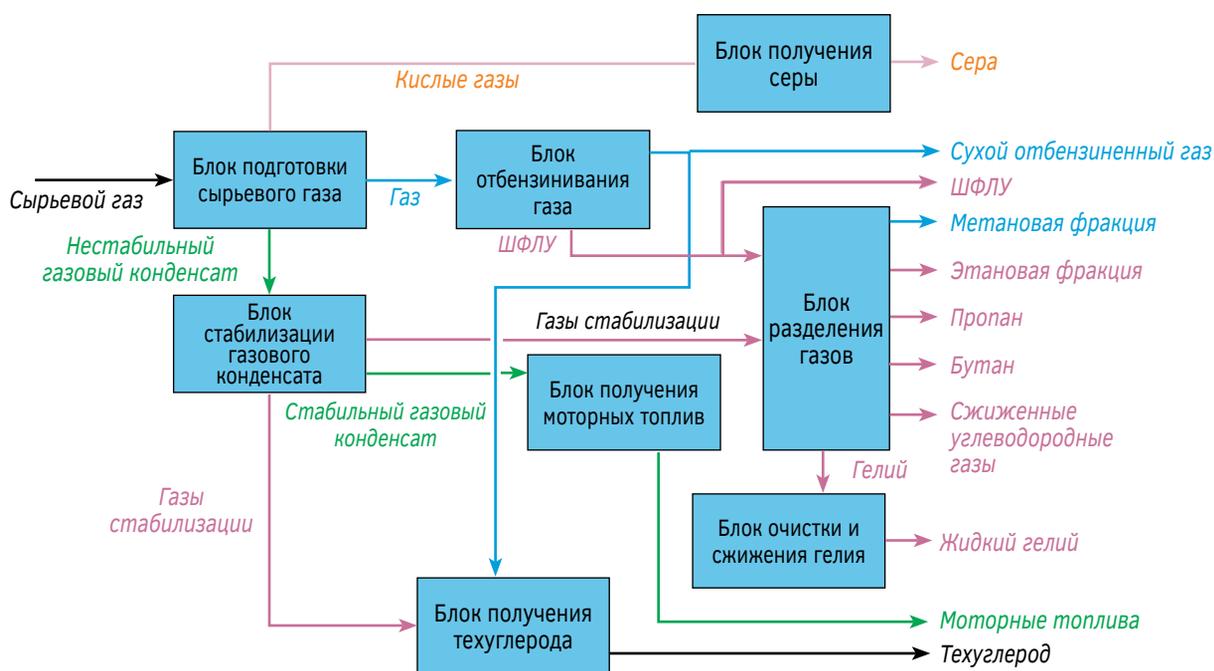


Рис. 6.9. Принципиальная схема газоперерабатывающего завода

Природный газ является промышленным источником гелия. Гелий находит широкое применение во многих областях науки и техники, а объемы и области его использования характеризуют уровень развития государства. Гелий используют при сварке металлов, приготовлении дыхательных смесей, в производстве сверхчистых и полупроводниковых материалов, в качестве газа-носителя в хроматографии, в ЯМР-спектроскопии, для заполнения метеозондов как теплопроводную среду в атомных реакторах, для получения сверхнизких температур для сверхпроводящих систем.

Технический углерод (сажа) представляет собой частицы со средним диаметром 10–40 нм, в состав которых входит более 90% углерода, содержащие также водород, кислород, минеральные примеси. Технический углерод применяется в качестве наполнителя в шинной, резинотехнической промышленности, при производстве угольных электродов, красок, в полиграфии.

На некоторых газоперерабатывающих предприятиях производят одоранты, предназначенные для добавления в природный газ и придания ему характерного запаха.

Сжиженный природный газ (СПГ, LNG — liquefied natural gas) — природный газ, переведенный в жидкое состояние при температурах ниже критической для облегчения транспортирования на рынки, отдаленные от месторождений и магистральных газопроводов. Сжиженный природный газ рассматривается как перспективный вид газомоторного топлива.

Сырьем газоперерабатывающих заводов является природный газ газовых или газоконденсатных месторождений или попутный нефтяной газ. Газы чисто газовых месторождений

состоят в основном из метана с невысоким содержанием углеводородов C_2-C_4 . Газы газоконденсатных месторождений отличаются повышенным содержанием углеводородов C_{5+} , которые конденсируются со снижением пластового давления. В отличие от природных газов, залегающих в недрах самостоятельно, попутные газы растворены в нефти и после извлечения содержат больше углеводородов C_{2+} , причем их состав может меняться со временем эксплуатации скважины: от более легких углеводородов в начальный период до более тяжелых по мере падения давления в скважине.

Добываемый на промысле природный (сырьевой) газ, помимо метана, может содержать механические примеси, влагу, углеводородные и неуглеводородные компоненты, требующие извлечения перед дальнейшим транспортированием с помощью различных технологий переработки газа.

Типовая поточная схема современного газоперерабатывающего завода включает в себя процессы подготовки сырьевого газа к переработке (очистка от механических и химических примесей, осушка); процессы разделения углеводородных газов (низкотемпературная абсорбция, низкотемпературная конденсация, низкотемпературная ректификация, низкотемпературная адсорбция); процессы стабилизации газовых конденсатов; процессы извлечения гелия, а также процессы химической переработки (получение серы, технического углерода).

Подготовка сырьевого газа к переработке

Сырьевой газ перед переработкой подвергают очистке от механических примесей, паров воды и кислых газов.

Существуют сухие и мокрые методы очистки газа от механических примесей. Сухую газоочистку осуществляют с использованием циклонов, пылесадительных камер, рукавных фильтров, электрофильтров. При мокрой очистке применяют мокрые циклоны, скрубберы, промывные башни, пенные аппараты.

Осушку газов осуществляют абсорбционными, адсорбционными методами, охлаждением.

Наиболее часто применяется абсорбционная осушка природного газа жидким осушителем. Технология основана на селективном поглощении насыщенных паров воды из газа водными растворами гликолей. На практике применяют два варианта технологических схем осушки: с барботажными абсорберами и с впрыском гликоля. Первый вариант требует высокой степени регенерации (до 99%) гликоля, но при этом позволяет уменьшить его расход. В схеме с впрыском выше потери гликоля возможно применение осушителя с содержанием гликоля до 80%. Технико-экономические показатели осушки зависят от температуры, давления, концентрации абсорбента и кратности циркуляции. Процесс проводят при температуре 45–50°С. С увеличением температуры возрастает парциальное давление паров влаги над гликолем, что приводит к повышению точки росы осушаемого газа. При повышении давления уменьшается содержание влаги в газе и требуется меньше абсорбента для получения газа с заданными параметрами. Со снижением концентрации гликоля снижается точка росы осушаемого газа. Кратность циркуляции определяется как отношение объема циркулирующего гликоля к массе извлекаемой влаги. Типичное значение кратности циркуляции — 10–35 л/кг.

Технология адсорбционной осушки основана на селективном поглощении влаги поверхностью или объемом пор твердого адсорбента при относительно низких температурах и выделении ее при повышении температуры или снижении давления. В качестве адсорбентов применяются твердые вещества с развитой поверхностью пор: окись алюминия, цеолиты, алюмосиликаты, силикагель. Для улучшения газодинамических характеристик адсорбенты выпускают в форме гранул или сфер. Процесс адсорбционной осушки проводят в аппаратах периодического действия с неподвижным слоем адсорбента с попеременной сменой циклов «адсорбция-десорбция». Цикл адсорбции проводят при температуре 35–50°С,

давлении 8–12 МПа и времени контакта порядка 10 с. Цикл десорбции осуществляют при температурах 160–350°С в зависимости от типа используемого адсорбента газом с низким парциальным давлением водяного пара. При осушке газа, содержащего углеводороды C_{4+} , требуется периодическая регенерация адсорбента путем выжигания кокса. Преимуществом метода адсорбционной осушки является возможность достижения высокой глубины осушки газа и относительно малые габариты установок. К недостаткам следует отнести высокую стоимость адсорбентов, большой перепад давления.

Осушка охлаждением, как правило, используется в комбинации с другими методами.

Очистку газов от кислых газов осуществляют абсорбционными, адсорбционными и каталитическими методами.

Технологии извлечения углеводородных компонентов из природного газа

Развитие низкотемпературных методов разделения углеводородных газов обусловлено ростом спроса на индивидуальные углеводороды и сжиженные газы. Для извлечения из сырьевого газа углеводородов C_2-C_5 применяют различные технологии отбензинивания газов, низкотемпературную сепарацию, компрессионный метод, низкотемпературную абсорбцию, низкотемпературную конденсацию, низкотемпературную ректификацию, низкотемпературную адсорбцию.

Низкотемпературная сепарация

Процесс низкотемпературной сепарации направлен на извлечение жидких углеводородов (газового конденсата) из газовой фазы при их конденсации в интервале температур от –10°С до –25°С. Холод получают за счет дроссельного эффекта с применением дросселя или детандера. Для предотвращения гидратообразования применяют ингибиторы (метанол, гликоли). Эффективность работы установок низкотемпературной сепарации зависит от температуры, давления, состава сырьевого газа, количества ступеней сепарации. Для извлечения жидких углеводородов из тощих газов требуются более низкие температуры, чем для переработки жирных. Давление процесса определяется требуемым давлением в магистральном трубопроводе. Увеличение числа ступеней сепарации повышает четкость разделения газожидкостной смеси.

Низкотемпературная конденсация

Результатом развития процесса низкотемпературной сепарации стало появление технологии низкотемпературной конденсации, основанной на охлаждении газа при постоянном давлении до значительно более низких температур, при которых выпадает жидкая фаза. Технологические схемы низкотемпературной конденсации могут отличаться видом источника холода, числом ступеней сепарации, составом получаемого продукта. Классическая схема низкотемпературной конденсации состоит из компрессора, сепараторов, воздушного холодильника, теплообменников, дезтанизатора или деметанизатора, пропановых испарителей. Сырьевой газ после дожима в компрессоре охлаждают в воздушном холодильнике и теплообменниках и направляют в пропановый испаритель, в котором газ частично конденсируется. Сконденсированные углеводороды разделяют в сепараторе на сухой газ и конденсат, которые после регенерации холода направляют соответственно в магистральный газопровод и дезтанизатор. В дезтанизаторе конденсат разделяют на смесь метана и этана, широкую фракцию легких углеводородов. На газоперерабатывающих предприятиях используют различные варианты технологических схем — например, с применением внешнего, внутреннего или комбинированного холодильного цикла — с одной, двумя или тремя ступенями сепарации.

Установки низкотемпературной конденсации работают при температурах до -120°C , давлениях до 11 МПа. С ростом давления повышается степень конденсации углеводородов, но вместе с тем снижается селективность. Увеличению селективности и степени конденсации способствует изобарное понижение температуры. В качестве хладагента применяют аммиак, индивидуальные углеводороды $\text{C}_2\text{--C}_3$ и их смеси. В схеме с внутренним холодильным циклом применяют дроссели или турбодетандеры. Применение турбодетандеров, высокоэффективных теплообменников и современных теплоизоляционных материалов позволяет существенно повысить технико-экономические характеристики процесса низкотемпературной конденсации.

Низкотемпературная абсорбция

Абсорбционные методы базируются на достижении равновесия между потоками газовой и жидкой фаз за счет диффузии из одной фазы в другую. В технологическую схему низкотемпературной абсорбции, как правило, включены абсорбер и десорбер, представляющие собой ректификационные колонны насадочного или тарельчатого типа, а также теплообменное оборудование. В абсорбере сырьевой газ контактирует с абсорбентом, в результате чего происходит поглощение тяжелых углеводородных компонентов. С низа абсорбера выводят насыщенный абсорбент и направляют в десорбер на регенерацию, с верха отводят отбензиненный газ. В десорбере из абсорбента извлекают компоненты газа, а регенерированный (тощий) абсорбент возвращают в абсорбер. Недостатком такой двухколонной схемы является потеря значительного количества абсорбированных углеводородов. Для уменьшения потерь метана и этана в технологическую схему низкотемпературной абсорбции включают промежуточную абсорбционно-отпарную колонну, в которой из насыщенного абсорбента выделяют эти углеводороды перед подачей в десорбер. Для снижения потерь углеводородов C_{3+} в схему включают компрессор для рециркуляции несконденсировавшихся газов в поток свежего газа. Еще одним вариантом организации процесса является двухступенчатая абсорбция, при которой используют легкий и тяжелый абсорбенты с целью снижения уноса поглотителя с газом.

Низкотемпературную абсорбцию проводят при температурах минус $30\text{--}60^{\circ}\text{C}$ и давлениях $3,5\text{--}7,5$ МПа. Десорбцию, как правило, осуществляют при давлениях до 2,0 МПа. В качестве абсорбента, как правило, применяют керосиновые, дизельные, бензиновые фракции и их смеси.

Преимуществом технологии низкотемпературной абсорбции является возможность разделять углеводородные газы при относительно умеренном холоде с использованием пропановых испарителей, в связи с чем расходы на получение холода значительно ниже, а также относительно низкая чувствительность к колебаниям состава сырьевого газа. Недостатками процесса являются меньшая четкость разделения углеводородов по сравнению с низкотемпературной ректификацией и низкотемпературной адсорбцией, необходимость очистки отходящего газа от паров абсорбента.

Низкотемпературная адсорбция

Технология низкотемпературной адсорбции основана на различной способности компонентов сырьевого газа адсорбироваться на поверхности твердого поглотителя или в объеме его пор. Низкотемпературную адсорбцию применяют при низких парциальных давлениях извлекаемых компонентов сырьевого газа. Процесс осуществляют в адсорберах кольцевого типа «труба в трубе», в которых межтрубное пространство заполнено адсорбентом. Более эффективны адсорберы в виде кожухотрубчатых теплообменников, в которых адсорбентом заполняют трубное пространство, а по межтрубному пространству организуют циркуляцию хладагента. Развитие технологии привело к появлению современной схемы процесса короткоциклового адсорбции, включающей три адсорбера, в каждом из которых одновременно

проводят адсорбцию, десорбцию и охлаждение, теплообменное оборудование, автоматическую систему переключения циклов.

Эффективность технологии низкотемпературной адсорбции во многом зависит от организации теплосъема в адсорберах, поскольку процесс адсорбции является экзотермичным. Цикл адсорбции проводят при температурах 30–70°С и давлении сырьевого газа в течение 15–60 мин в зависимости от компонентного состава. В качестве адсорбента применяют цеолиты, силикагель, активированный уголь.

Преимуществом технологии низкотемпературной адсорбции является возможность достижения высоких степеней очистки продуктов благодаря высокой селективности процесса. Среди недостатков следует отметить высокие эксплуатационные затраты.

Технологии газофракционирования и стабилизации газового бензина

На газофракционирующих установках перерабатывают широкую фракцию легких углеводородов методом ректификации с выделением индивидуальных углеводородных фракций и получением стабильного газового бензина. Технологическая схема газофракционирующей установки определяется составом и давлением сырья и включает несколько ректификационных колонн (например, пропановую, бутановую, изобутановую), конденсаторы-холодильники, насосы, теплообменники.

Технологии извлечения гелия

На газоперерабатывающих заводах гелий выделяют из природного газа криогенными способами в комбинации с методами очистки в несколько стадий. На криогенных установках получают гелиевый концентрат с содержанием гелия 80–95%, затем направляют на концентрирование до 99,98% и ожижение. Выбор технологической схемы извлечения гелия зависит от многих факторов: состава природного газа и концентрации гелия в нем, давления, требований к чистоте товарного гелия, производительности установки. Как правило, технологическая схема извлечения гелия содержит узел предварительного охлаждения, включающий трубчатые и пластинчатые теплообменники, в которых газ охлаждается до температуры –100°С; узел конденсации, в котором в прямоточных и противоточных конденсаторах осуществляется сжижение всех компонентов газа, кроме гелия и водорода, с получением гелиевого концентрата; узел глубокой очистки, включающий стадию каталитического окисления водорода кислородом воздуха, стадию глубокой осушки на цеолитах или окиси алюминия, стадию удаления следов азота, стадию адсорбционной доочистки на активированном угле с получением товарного гелия с концентрацией 99,98 об %. За рубежом достаточно широко распространены мембранные процессы газоразделения, в которых газовая смесь под давлением подается в мембранный модуль с разделением на проникший и непроникший потоки. Преимуществом мембранного газоразделения является большая селективность, низкие эксплуатационные затраты. Мембранные процессы показывают высокую эффективность при применении на стадии конечного концентрирования гелия. Товарный гелий реализуют в сжатом виде в баллонах под давлением до 15 МПа либо в сжиженном виде в сосудах Дьюара. Ожижение гелия осуществляют криогенными методами сжижения газов с применением детандерных циклов. Крупномасштабное долгосрочное хранение гелия осуществляется в подземных криогенных хранилищах.

Технология производства технического углерода (сажи)

Наиболее распространенным методом получения техуглерода является печной способ путем термоокислительного разложения природного или попутного нефтяного газа в условиях недостатка воздуха. Технологическая схема производства сажи печным способом

включает футерованную огнеупорным кирпичом реакционную печь, оросительный холодильник, оборудование для улавливания частиц сажи (электрофильтры, циклоны, скрубберы, рукавные фильтры), сепаратор для отделения сажи, барабан-гранулятор. В реакционной печи происходит разложение углеводородного сырья в турбулентном потоке при температурах до 1300°С с образованием сажи и дымовых газов. Из сажегазового потока выделяют сажу с помощью различных методов улавливания и направляют на грануляцию сухим или мокрым способом.

Менее распространен метод получения сажи осаждением из диффузионного пламени, в котором сажу выделяют из пламени горящего в камерах природного или попутного нефтяного газа на движущуюся осадительную поверхность.

Преимуществами печного способа получения сажи являются высокий выход продукции, низкая себестоимость, высокие природоохранные характеристики процесса по сравнению с канальным методом.

Технологии производства серы

На газоперерабатывающих заводах сероводород, извлекаемый из сырьевого газа в составе кислых газов, перерабатывают в элементарную серу методом Клауса путем двухстадийного окисления. На первой термической стадии проводят окисление сероводорода кислородом воздуха при температуре 900–1300°С до диоксида серы. На второй каталитической стадии проводят реакцию между сероводородом и диоксидом серы в присутствии алюмооксидного катализатора при температуре 220–250°С с образованием элементарной серы. Технологическое оформление процесса Клауса выбирается с учетом состава кислых газов и, как правило, включает печь-реактор, каталитический конвертор, конденсатор серы, теплообменное оборудование.

Для соблюдения нормативов допустимых выбросов и увеличения выхода серы установки Клауса комбинируют с установками доочистки отходящих газов, которые позволяют повысить степень извлечения серы до 99,6–99,9%. Применяют различные процессы доочистки отходящих газов: на основе каталитической реакции сероводорода с оставшимся в хвостовых газах диоксидом серы; на основе окисления сернистых соединений до диоксида серы и каталитического восстановления сернистых соединений до сероводорода с возвратом последнего обратно на установку Клауса.

Товарную серу выпускают в виде комовой, жидкой, формованной (чешуированной, пластинчатой), гранулированной и коллоидной серы. Технология получения комовой серы является устаревшей и представляет собой транспортирование жидкой серы по обогреваемому трубопроводу на склад с образованием застывших блоков и их разрушением на куски. Недостатком такой технологии является пылеобразование, потери продукта, использование ручного труда. Еще одним примером устаревшей технологии может служить получение чешуированной и пластинчатой серы. Чешуированную серу получают кристаллизацией серы на внешней поверхности охлаждаемого водой барабана с получением тонких чешуек серы. При получении пластинчатой серы кристаллизацию осуществляют путем распределения тонкого слоя расплава по охлаждаемой водой поверхности движущейся ленты. В жидком виде товарную серу можно транспортировать до потребителя в обогреваемых авто- и железнодорожных цистернах. Несмотря на отсутствие потерь и высокую чистоту продукта, применению жидкой серы сопутствует ряд проблем: опасность возгорания при сливе, необходимость строительства специальных хранилищ. Необходимость соответствия возрастающим требованиям к качеству продукта и к охране окружающей среды привела к разработке ряда технологий производства гранулированной серы с применением вращающихся барабанных грануляторов, грануляционных башен, грануляторов в кипящем слое. Коллоидную серу получают путем размола до мелкодисперсного состояния или экстракционными методами.

Технологии сжижения природного газа

Технологическая схема установок производства сжиженного природного газа включает стадии очистки, осушки, ректификации, сепарации углеводородов, сжижения с помощью различных криогенных циклов. Установки сжижения состоят из набора пластинчатых теплообменников, абсорберов, сепараторов, компрессорного оборудования.

Сжижение природного газа проводят при давлениях, близких к критическому (около 5 МПа), и температурах до $-161,5^{\circ}\text{C}$.

СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ

Основным показателем для сравнения технологий процессов переработки углеводородов целесообразно выбрать общетехнологический показатель — *ресурсоемкость*, который в случае нефтепереработки приобретает смысл объема выработки дистиллятных продуктов на единицу объема нефти. Остальные сравнительные показатели могут быть определены при рассмотрении основных особенностей применения нефтепродуктов:

1) В истории нефтепереработки требования к нефтепродуктам неоднократно менялись вследствие эволюции технологий, для применения в рамках которых они предназначены. Так, детонационная характеристика бензинов (октановое число) периодически корректировалась в лучшую сторону с совершенствованием соответствующих двигателей внутреннего сгорания. Естественно, что повышение требования к свойствам топлив приводило к модернизации имеющихся технологий нефтепереработки или к внедрению новых.

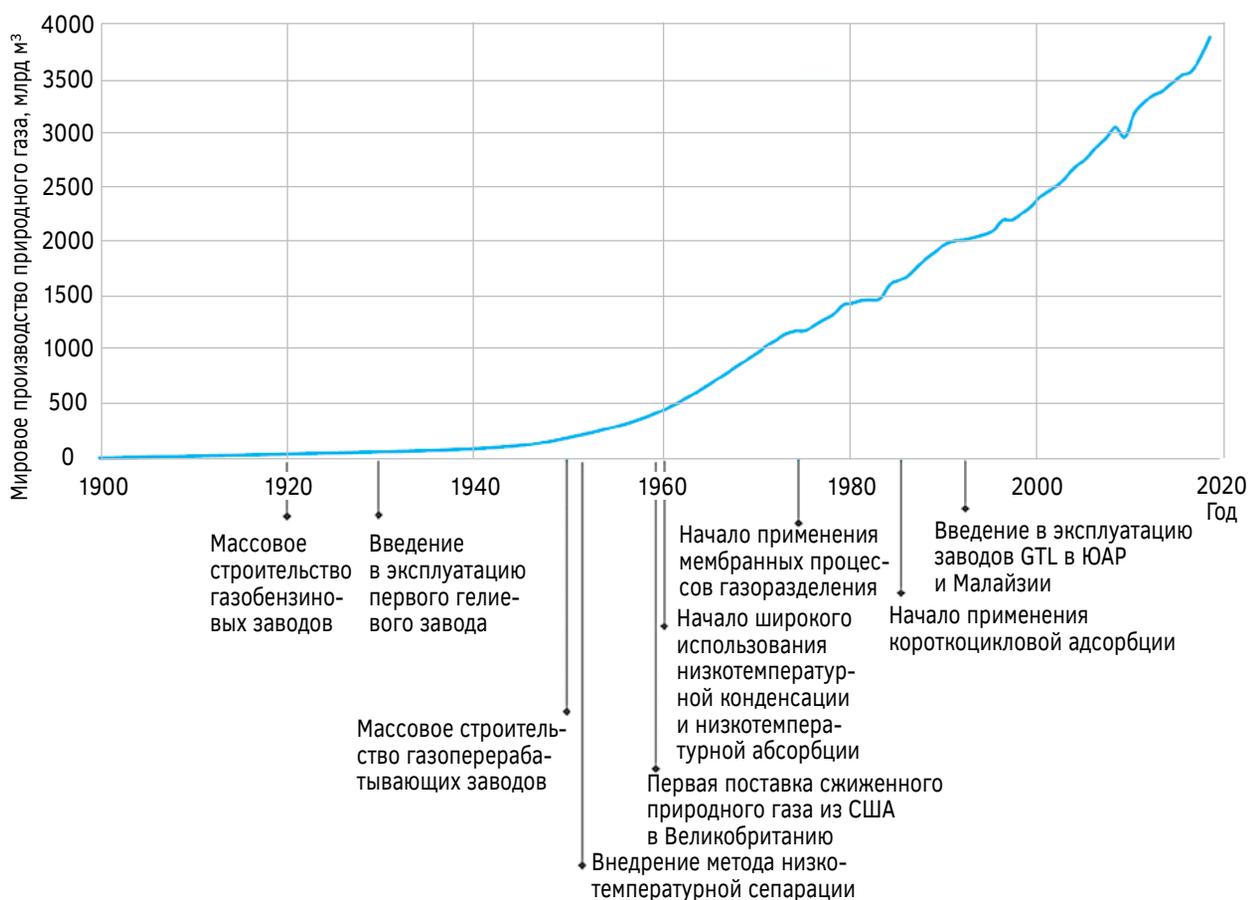


Рис. 6.10. Динамика развития газоперерабатывающей отрасли

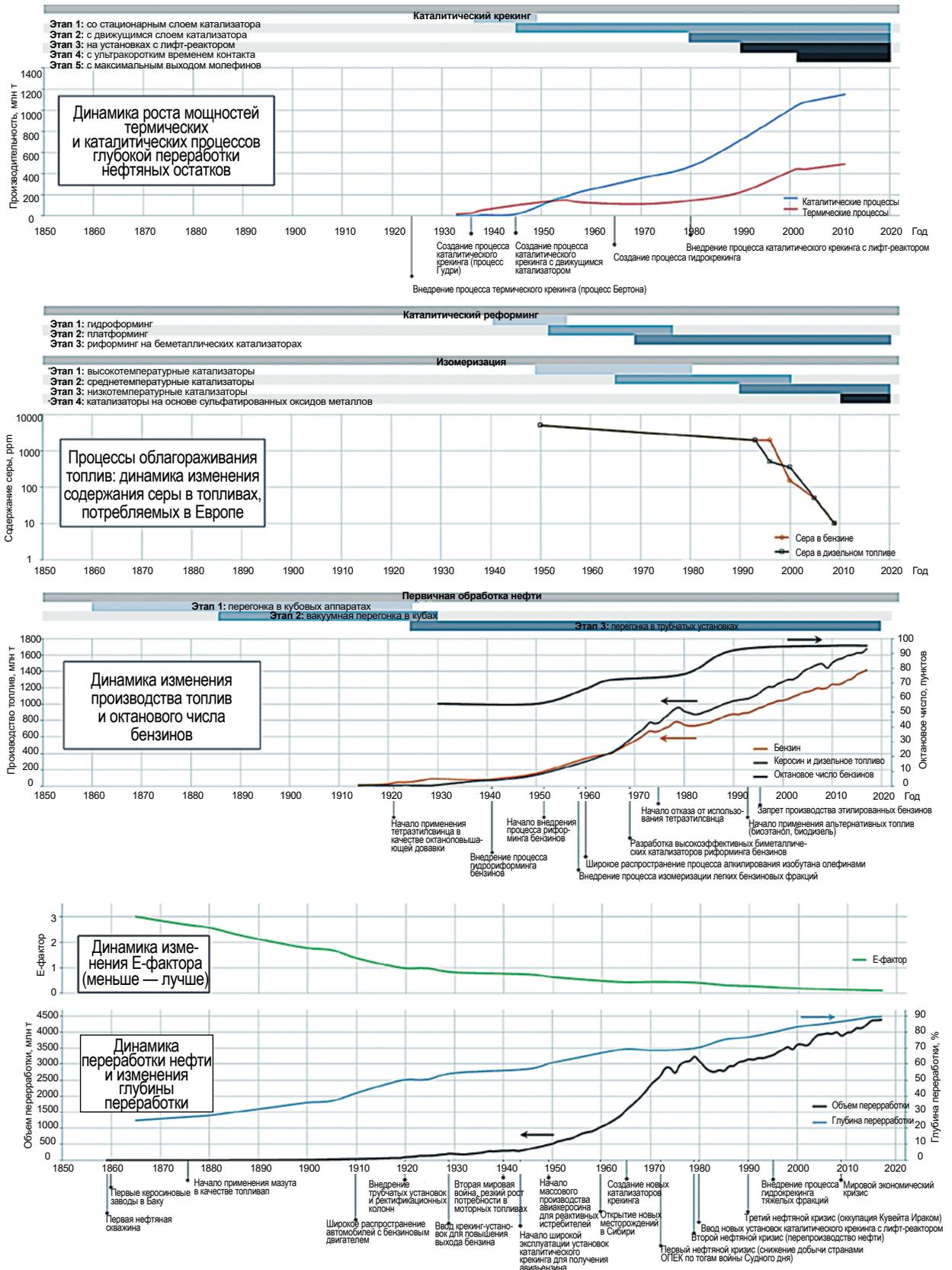


Рис. 6.11. Динамика развития нефтеперерабатывающей отрасли (по данным [2, 8, 25, 27, 32–34, 36–38, 43, 44, 47, 49, 50, 55, 54, 57])

2) Важнейшим фактором применения нефтепродуктов является экологический. Нефти содержат в среднем 1,5–2,0% серы, а большая часть нефтепродуктов служит топливом, что приводит к попаданию серы в атмосферу в виде экологически вредных соединений. Ужесточение экологического законодательства приводит к модификации технологий производства топлив в сторону снижения содержания серы. При этом энергоэффективность технологий зачастую снижается в угоду политическим и законодательным причинам. Поэтому энергоэффективность как фактор сравнения технологий малоприменима к нефтепереработке. Вместе с тем в качестве фактора сравнения может быть использована *экологичность* нефтепродуктов, выражаемая в виде содержания в них сернистых соединений.

3) Для переработки нефти также можно ввести понятие E-фактора — показателя, характеризующего образование побочных продуктов на единицу целевой продукции (рис. 6.11). Такой подход несколько отличается от классического определения E-фактора (количество отходов на единицу продукции), однако позволяет учесть специфику нефтепереработки.

4) Показателем для сравнения поколений процессов газопереработки может служить ассортимент выпускаемой продукции: развитие технологий переработки газа позволяло извлекать все большее количество компонентов из газового сырья.

Первичная переработка нефти

В промышленной практике первичной переработки нефти выделяют три основных технологических вехи:

1) Перегонка в кубовых аппаратах (1860–1920-е гг.). Технологический первый, наиболее простейший, этап переработки нефти, которым зачастую она и ограничивалась. Перегонный куб представлял собой вертикальный цилиндр высотой 6,5 м и диаметром 2,5 м, который наполнялся до определенного уровня нефтью. Далее куб начинал обогреваться снизу с помощью нефтяной форсунки (до изобретения таковой русским инженером В. Г. Шуховым нагрев производился дровами); появляющиеся пары отводились через шлемовую трубу и дефлегматор в холодильники для конденсации. Жидкий продукт далее поступал в сепаратор для отделения водяного конденсата и выделения целевого продукта.

Основными недостатками кубов периодического действия были небольшая эффективность установки и невозможность рациональной утилизации тепла горячих остатков, получаемых при перегонке. В первом приближении эту проблему решили путем объединения нескольких кубов в единую кубовую батарею непрерывного действия (1880-е гг.). Основной технологической единицей была так называемая керосиновая батарея, содержавшая до 12 отдельных кубов. Каждый куб нагревался до более высокой температуры, нежели предыдущий. Такая организация работы обладала следующими достоинствами:

- из каждого куба возможен отбор дистиллята с различной плотностью и температурой кипения; отдельно отбирались бензиновые и керосиновые фракции. Тем не менее степень разделения фракций друг от друга была довольно небольшой — керосиновые фракции содержали значительное количество бензиновых и наоборот;
- технологическая схема куба допускала непрерывную перегонку нефти.

У перегонки в кубах и кубовых батареях было несколько основных недостатков:

- невозможность перегонки при температурах свыше 280–300°С вследствие разложения компонентов нефти;
- малая единичная производительность;
- большие теплотери при проведении процесса;
- крайне слабая погоноразделительная способность кубовой батареи.

Избавление от этих недостатков произошло с достижением следующих вех в технологии перегонки.

2) Вакуумная перегонка в кубах (1880–1920-е гг.).

Решением проблемы дальнейшей переработки мазута явилось применение перегонки при пониженном давлении. Такая установка (т. н. масляная батарея) содержала 12–15 кубов;

в ряде случаев количество кубов доходило до 20. Шлемовые трубы кубов выполнялись длиной более 20 метров, что позволяло конденсировать масляные фракции еще до входа в дефлегматор. Окончательная конденсация масляных фракций проводилась при повышенной температуре (70–80°С), что исключало их застывание в дефлегматоре. Наконец, важнейшей частью установок была вакуумсоздающая система (водяной эксгаузер). В этой системе пары из кубов конденсировались холодной водой, что вело к снижению общего давления в системе и увеличению скорости движения паров по установке.

Несмотря на высокую эффективность использования вакуума при перегонке (в отдельных системах глубина вакуума достигала 3–5 мм рт. ст.), общее несовершенство технологии перегонки нефти приводило к малому выходу масел из мазута относительно их потенциального содержания, низкому качеству получаемых масел и вакуумного остатка.

3) Перегонка в трубчатых установках (1920-е — настоящее время).

Наиболее передовой технологией разделения нефти на фракции является перегонка в трубчатых установках. Здесь процесс разделен на две стадии: нагрев нефти до 220–370°С в специальных трубчатых печах и последующее разделение в ректификационных колоннах. Нагрев нефти в печи позволяет наиболее полным образом использовать тепло сгорания топлива, в то время как колонна осуществляет четкое разделение паров, образовавшихся при испарении нефти, на фракции. Ректификационная колонна — вертикальный цилиндрический аппарат, заполненный тарелками специальной конструкции либо (в случае вакуумных колонн) пакетами насадки, представляющие собой керамические либо стальные элементы размером 3–5 мм различной конфигурации. Внутренние устройства колонны выполняют роль контактных устройств, на которых происходит смешение поступающих снизу паров и поступающей сверху жидкости. Контакт жидкости и паров в сочетании с температурным градиентом по колонне (сверху температура ниже, чем снизу) способствует разделению нефти на фракции. Поток жидкости сверху при этом создается путем конденсации и охлаждения дистиллята в дефлегматоре и возвращения его части в колонну сверху; поток паров — путем перегрева остатка, отходящего с низу колонны.

Внедрение трубчатых установок создало возможности для резкого увеличения объемов переработки нефти, т. к. даже ранние варианты трубчатых установок обладали единичной производительностью вплоть до 1 млн т/год. Удачность концепции обусловило применение «трубчаток» и в настоящее время; единичная производительность составляет, как правило, 2–6 млн т/год. Первичная переработка нефти — яркий пример, когда технологическое развитие процесса опередило по-настоящему массовую добычу сырья.

Облагораживание топлив

Р и ф о р м и н г. Процесс риформинга — один из самых крупнотоннажных процессов производства бензинов. Хотя в настоящее время процесс риформинга несколько теряет свое значение вследствие ограничения содержания ароматических углеводородов в бензинах, он до сих пор представляет собой важнейший процесс нефтепереработки.

Эволюция процесса риформинга протекала одновременно в следующих направлениях, неотрывно связанных друг с другом:

- обеспечение более длительной работы катализатора;
- увеличение селективности катализатора по целевым продуктам

Первый этап — гидроформинг. Процесс риформинга впервые был внедрен в 1941 г. Катализатором процесса служил оксид молибдена, нанесенный на оксид алюминия; условия процесса — 480–540°С, 1–2 МПа. Время реакции составляло всего 4 часа, что вынуждало иметь несколько реакторов на установке — часть из них осуществляла реакцию, часть — регенерацию. Октановое число конечного бензина составляло 78 п. по ММ и 84 п. по ИМ, выход стабильного бензина — всего 74–75%.

Второй этап — платформинг. Низкое октановое число и малый выход бензина в процессе гидроформинга привели к разработке нового процесса риформинга — платформинга.

В этом процессе катализатором служит платина, нанесенная на оксид алюминия, активированный хлором или фтором. Впервые установка по данному процессу была запущена в 1952 г. Спустя четыре года подобная установка была освоена в СССР на отечественном катализаторе АП-56 (позднее — АП-64). Октановое число конечного бензина составляло 84 п. по ММ и 95 п. по ИМ, выход стабильного бензина — 83%.

Третий этап — биметаллические катализаторы. На текущем этапе развития процесса риформинга используются биметаллические катализаторы. Начало перехода к этому этапу можно отнести к 1969 г., когда был получен первый патент на катализатор такого рода. В качестве второго металла используют добавки рения, олова и иридия, что позволяет значительно увеличить стабильность катализатора (межрегенерационный цикл составляет до 3 лет) и соответственно понизить рабочее давление в реакторе до 1,5–1,8 МПа. В СССР платино-ренивые катализаторы марок КР (КР-102, КР-102 с, КР-104, КР-106, КР-108, КР-110) и РБ (РБ-1, РБ-11, РБ-22) стали использовать к концу 1980-х гг. Разработкой процесса занимались институты «ВНИИНефтехим» и «Ленгипронефтехим». Октановое число конечного бензина составляет 85–87 пп. по ММ и 95–97 пп. по ИМ, выход стабильного бензина — до 90%.

Изомеризация. Впервые изомеризация как процесс производства компонента топлива был внедрен во время Второй мировой войны. В качестве сырья для изомеризации применялся н-бутан; в процессе изомеризации синтезировался изобутан, служивший добавкой к авиационным бензинам. После войны большая часть установок изомеризации такого типа была остановлена.

Следующий этап развития технологии изомеризации связан с ростом требований к автомобильному бензину. В 1958 г. пущена первая в мире установка изомеризации углеводородов C_5 – C_6 , сразу ставшая стандартом для нефтеперерабатывающих заводов. Дальнейший прогресс технологии изомеризации связан со сменой поколений катализаторов изомеризации в сторону снижения температуры процесса, т. к. селективность образования и октановое число конечного компонента бензина при этом увеличиваются.

1 поколение — высокотемпературные катализаторы. Исторически первые катализаторы представляли собой платину, нанесенную на оксид алюминия. Носитель активировался с помощью фтороводорода, приобретая кислотную функцию. Данные катализаторы проявляли активность при повышенной температуре (380–420°С).

2 поколение — среднетемпературные катализаторы. С открытием каталитической активности цеолитов они активно применялись для синтеза катализаторов изомеризации (1960-е гг.). Цеолитные катализаторы проявляют активность при температурах 250–350°С, как следствие, изомеризат имеет октановые числа 76–78 пп. по исследовательскому методу. Положительной стороной цеолитных катализаторов является отсутствие необходимости в активации галогенсодержащими агентами, высокая устойчивость к примесям в сырье (вода, сернистые соединения и т. д.), а также способность к полной регенерации непосредственно в реакторе установки. Особенностью цеолитных катализаторов относительно других является необходимость обеспечения более высокого соотношения водород/сырье, т. к. часть водорода расходуется также на гидрирование ароматических углеводородов, содержащихся в сырье.

3 поколение — низкотемпературные катализаторы. Катализаторы на основе хлорированной окиси алюминия наиболее активны при низких температурах, за счет чего обеспечивают высокий выход и октановое число изомеризата. По аналогии с катализаторами первого поколения низкотемпературные катализаторы также нуждаются в активации, которая проводится с помощью хлороводорода или хлороорганических соединений. Для поддержания активности катализатора в процессе реакции в сырье процесса вводится хлороорганика (обычно четыреххлористый углерод) в количестве 5 ppm. Наличие в изомеризате остаточного органического хлора обуславливает особенности аппаратного оформления установки изомеризации: после реактора осуществляется щелочная промывка продукта в специальных

аппаратах — скрубберах. Как и любые катализаторы на основе окиси алюминия, данный тип катализаторов чувствителен к ряду каталитических ядов (вода, сера, азот), что является существенным недостатком. Хлорированные катализаторы не подвергаются регенерации; срок их службы составляет 3–5 лет.

3+ поколение — катализаторы на основе сульфатированных оксидов металлов. В настоящее время разрабатываются перспективные типы катализаторов изомеризации на основе сульфатированного оксида циркония. Данный носитель обладает преимуществами цеолитов и оксида алюминия:

- катализатор нечувствителен к примесям воды в сырье и не нуждается в хлорировании;
- катализатор проявляет максимальную активность при низких температурах;
- катализатор может быть регенерирован, что продлевает срок его службы.

Гидроочистка. Процесс гидроочистки дистиллятов на сегодняшний день является примером законченной технологии. Современное развитие процесса является эволюционным и обусловлено разработкой новых катализаторов с повышенной активностью и увеличенным сроком службы.

Действующие стандарты на моторные топлива подразумевают необходимость глубокой гидроочистки до остаточного содержания серы менее 10 ppm. Существуют две технологии глубокой гидроочистки:

1. *Сверхглубокая гидроочистка* на алюмокобальтмолибденовых или алюмокобальтникелевых катализаторах, протекающая при высоком давлении (до 9–10 МПа), температуре порядка 315–360°С, высоком расходе водорода и низкой объемной скорости подачи сырья 0,5–1,0 ч⁻¹. Для достижения высокой степени очистки применяются два последовательно расположенных реактора. Такая схема обычно применяется при гидроочистке прямогонного сырья с небольшим содержанием серы.

2. *Двухступенчатая гидроочистка* сырья. На первой ступени осуществляется промежуточная гидроочистка сырья при температуре 320–400°С и давлении до 6 МПа до остаточного содержания серы порядка 50–100 ppm в присутствии обычного катализатора гидроочистки, а на второй ступени проводится гидрирование при давлении ~3–5 МПа, температуре 260–340°С, объемной скорости подачи сырья 0,5–1,0 ч⁻¹ на катализаторе, содержащем благородные металлы (платина или палладий). По такой схеме перерабатываются дистилляты с высоким содержанием ароматических углеводородов, в том числе дистилляты вторичных процессов (висбрекинг, коксование).

Глубокая переработка нефтяных остатков

Процессы глубокой переработки нефтяных остатков подразделяются на термические и каталитические. Термические процессы были разработаны в 1920–1930-х гг. с целью увеличения выработки бензина и керосина из нефти; по мере совершенствования технологии, благодаря новым научным открытиям в области катализа все большее значение начали приобретать каталитические процессы.

Каталитический крекинг. Каталитический крекинг — уникальный процесс, развитие которого протекало как по экстенсивному, так и по интенсивному пути. Начальные этапы развития процесса обусловлены совершенствованием технологии катализаторов и аппаратного оформления, позднейшие — адаптацией процесса для производства новых видов продукции и для использования новых источников сырья.

1-й этап — прототехнология (1915–1930). Первые полупромышленные установки каталитического крекинга были сооружены к 1915–1921 гг. под руководством Н. Д. Зелинского в России и А. М. МакАфи в США. Процесс проводился в автоклавах, в качестве сырья служила керосиновая фракция, а в качестве катализатора — безводный хлорид

алюминия. Процесс не получил широкого распространения в связи с высоким выходом побочных продуктов, а также трудностями в обращении с хлоридом алюминия в качестве катализатора.

2-й этап — установки со стационарным слоем катализатора (1930–1940). Вследствие возникшей потребности в автобензине был разработан новый промышленный процесс каталитического крекинга системы Гудри. Процесс протекал в стационарном слое катализатора, которым служили активированные природные глины. Время работы катализатора составляло порядка 30 минут, после чего он подвергался окислительной регенерации, т. е. процесс был периодический. Выход бензина в процессе крекинга (сырье — керосиновая фракция) составлял 25–30%. Было построено не менее 20 установок такого типа.

3-й этап — установки с движущимся слоем катализатора (1940–1970). В 1941 г. крупнейшими нефтяными компаниями США было подписано соглашение «Recommendation 41», в рамках которого компании объединяли усилия в разработке нового процесса производства высокооктанового бензина. Была разработана методика приготовления синтетических алюмосиликатных катализаторов, а к 1945 г. был создан процесс «Термофор» с движущимся гранулированным катализатором. Переход к такому типу установок был необходим для организации непрерывной регенерации катализатора, что, в свою очередь, обеспечивало непрерывную работу установки в целом. В СССР флагманом исследования и разработок в области каталитического крекинга являлся Грозненский научно-исследовательский институт (ГрозНИИ), разработавший установку 43–102. Установки этого типа позволяли получить авиабензин с октановым числом 80–87 пп. и выходом до 27% при использовании керосино-газойлевых фракций в качестве сырья, а также увеличить единичную производительность до 200–300 тыс. т/год.

В рамках этого этапа также произошел прорыв в технологии катализаторов крекинга. Основой новых катализаторов стали кристаллические алюмосиликаты — цеолиты, каталитическая активность которых была открыта в конце 1950-х гг. К концу 1960-х гг. было организовано производство синтетических цеолитов и катализаторов крекинга на их основе. Внедрение цеолитсодержащего катализатора на отечественных установках крекинга позволило поднять выход авиабензина с 20,5% до 31,1% в среднем по отрасли при крекинге тяжелого сырья.

4-й этап — установки с лифт-реактором. Внедрение цеолитсодержащих катализаторов на предыдущем этапе предопределило дальнейшую эволюцию технологии процесса крекинга. Для наилучшего использования активности цеолитов была разработана технология с лифт-реактором с малым временем контакта — до 3 с. Также была разработана специальная форма катализатора в виде микросфер, содержащих цеолит типа Y в обменной форме с редкоземельными элементами. В 1976 г. проект был реализован в СССР в виде установки типа Г-43-107, тиражированной впоследствии на 10 различных советских и зарубежных заводах и впервые позволившей довести выработку компонента бензинов с октановым числом не менее 92 п. до 50–55% при работе на тяжелом сырье.

Дальнейшее развитие процесса каталитического крекинга направлено как в сторону увеличения степени переработки нефти, так и в сторону создания модификаций для переработки новых типов сырья и производства востребованных топлив и продуктов нефтехимии.

Крекинг тяжелых остатков и битуминозных нефтей. Каталитический крекинг успешно применяется для переработки остаточного сырья. Для решения проблемы высокой коксуемости регенерацию катализатора осуществляют в две стадии; для охлаждения катализатора, поступающего из регенератора, разработаны специальные твердофазные холодильники. Наибольшее распространение получили следующие установки — RSC с двухступенчатой регенерацией и отдельным выводом дымовых газов (UOP) и R2R с двумя регенераторами (IFP). Таким образом, в процессе каталитического крекинга возможна переработка сырья с коксуемостью до 10% и содержанием металлов до 30 ppm.

Крекинг углеводородов с максимальным выходом легких олефинов. Постоянно растущий спрос на пропилен вызывает необходимость в поиске новых способов его получения. Каталитический крекинг уже сейчас обеспечивает свыше 30% мирового производства пропилена. Выход мономера в процессе крекинга обычно составляет 3–5%. Для его повышения применяют введение в состав катализатора цеолитов других структурных типов. В качестве таковых успешно используются материалы типа MCM-22, ZSM-11, ZSM-23, Beta, ITQ-7, однако наибольшее применение нашел цеолит ZSM-5. В промышленности реализован целый ряд процессов крекинга с повышенным выходом легких олефинов: DCC (компании RIPP и SINOPEC), PetroFCC (UOP) и другие. Выход пропилена при переработке традиционного сырья крекинга может достигать 19–20%, а при использовании парафинистого сырья — до 23–25% при общем выходе олефинов C_2 – C_4 до 40–45%. Кроме олефинов, в количестве до 20% вырабатывается концентрат ароматических углеводородов C_6 – C_8 , пригодный для производства индивидуальных углеводородов.

Алкилирование. Стимулом к разработке нового процесса производства высокооктанового бензина послужил спрос на авиатопливо во время Второй мировой войны. Особенностью процесса алкилирования является его прямая зависимость от процессов глубокой переработки нефти — термического и, в особенности, каталитического крекинга. Именно эти процессы являются единственными «поставщиками» легких олефинов (пропилен, бутилены), являющимися неотъемлемым компонентом сырья установок алкилирования. В связи с этим интерес к алкилированию и первые технологии начали появляться после создания относительно крупнотоннажных установок каталитического крекинга.

Второй компонент сырья алкилирования — изобутан — может поступать с установок гидрокрекинга. После окончания Второй мировой войны во многих странах Западной Европы прогресс в технологии каталитического риформинга значительно увеличил объемы производства высокооктановых бензиновых фракций. В связи с этим интерес к технологиям получения алкилбензина несколько снизился, и в течение многих лет потребность в высокооктановом бензине, обусловленная ростом производства автомобилей, удовлетворялась процессом каталитического риформинга.

Новые экологические требования вновь привели к значимости процессов алкилирования. Так, согласно этим требованиям, в товарном бензине значительно ужесточились требования по содержанию бензола и других ароматических соединений, а также изоамиленов. Дополнительным плюсом является возможность регулировки концентрации бензола и ароматических соединений в товарном бензине.

Первый этап эволюции установок алкилирования. Строительство первых промышленных установок сернокислотного алкилирования началось в СССР в 1942 г. Первая установка для осуществления процесса сернокислотного алкилирования изобутана бутиленами в Советском Союзе была построена в Грозном по научно-исследовательским данным ГрозНИИ. Проект этой установки был выполнен Гипрогрознефтью.

Установки данного типа обладали рядом недостатков. Прежде всего, плохая смешиваемость катализатора и сырья процесса требует активных методов увеличения поверхности контакта, что на первом этапе не осуществлялось. Кроме того, для повышения селективности процесса необходимо проводить его при температуре -10 – 0°C . В силу несовершенства первых реакторов реакцию проводили зачастую при повышенной температуре вплоть до 30°C из-за недостатков конструкции системы охлаждения.

Второй этап эволюции установок алкилирования. Основной аппарат установок алкилирования — реактор, в котором должно осуществляться возможно более равномерное смешение сырья и катализатора — минеральной кислоты. В американской практике на начальном этапе внедрения процесса алкилирования нашли наибольшее распространение два типа реактора — с закрытой и открытой системой охлаждения продуктов реакции.

В реакторах первого типа отвод тепла осуществлялся за счет испарения хладагента (аммиак, пропан) в закрытой системе. Эмульсия сырья — катализатор создавалась за счет механических смесительных устройств специальной конструкции, расположенных внутри реактора. К этому типу относится вертикальный контактор «Стредфорда».

Особенностями второго типа реактора являлось создание низкой температуры в реакционной зоне путем испарения части находящихся в ней легких углеводородов и создание эмульсии углеводород — кислота за счет внешней циркуляции некоторого количества продукта с последующим пропуском его через систему смесителей и сопел.

По итогу промышленной практики наибольшее распространение нашли реакторы с закрытой системой охлаждения и постоянным механическим перемешиванием кислотной углеводородной эмульсии, которые применялись в составе установок алкилирования на заводах Грозного.

Третий этап эволюции установок алкилирования. Недостатки установок алкилирования — низкая температура процесса, большое количество отходов, сложное аппаратное оформление — потребовали очередного технологического прорыва. В последнее время был разработан ряд процессов с твердым гетерогенным катализатором алкилирования. Аппаратное оформление в этом случае практически не отличается от установок изомеризации; несмотря на малый срок непрерывной работы катализатора, несомненно, что установки данного типа являются наиболее передовыми.

Гидрокрекинг. Все существующие технологии гидрокрекинга вакуумного дистиллята основаны на реакторах со стационарным слоем катализатора. Различают три типа установок.

1. Установки легкого гидрокрекинга. Процесс данного типа протекает при температуре 400–450°С и давлении 10–12 МПа. Аппаратное оформление процесса аналогично гидроочистке.

2. Установки глубокого одноступенчатого гидрокрекинга. Давление в процессе одноступенчатого гидрокрекинга увеличено до 15 МПа по сравнению с легким гидрокрекингом; гидрогенизат после стабилизации частично подается на рецикл в реактор, а балансовое его количество выводится с установки.

3. Установки глубокого двухступенчатого гидрокрекинга. На первой ступени сырье подвергается гидроочистке и частичному гидрированию ароматических соединений при температуре 400–425°С и давлении 5–8 МПа. После стабилизации гидрогенизат подается на вторую ступень, где при 12–15 МПа и температуре 340–440°С подвергается непосредственно гидрокрекингу.

Выбор технологии в каждом конкретном случае обусловлен технологической схемой завода и ассортиментом производимых продуктов. Технология легкого гидрокрекинга применяется для получения низкосернистого вакуумного дистиллята, используемого в качестве сырья каталитического крекинга. Одноступенчатый гидрокрекинг применим в случае необходимости производства ультранизкосернистого керосина и дизельного топлива из сырья с малым содержанием серы и ароматических углеводородов. В процессе двухступенчатого гидрокрекинга перерабатывается сырье с высоким содержанием серы, азота и ароматических углеводородов.

Процессы переработки гудрона (висбрекинг, коксование, гидроконверсия). Исторически первым процессом переработки тяжелых нефтяных остатков был процесс термического крекинга, разработанный еще в 1913 г. на фоне развивающейся автомобильной промышленности и возрастающей потребности в бензине. Термический крекинг, или «процесс Бартона», осуществляется под давлением (от 2 до 7 МПа) при температуре 480–540°С. В качестве сырья могут использоваться как тяжелые остатки перегонки нефти (мазут, гудрон), так и фракции продуктов других процессов: тяжелый газойль

каталитического крекинга, тяжелая смола пиролиза и др. По мере развития процесса внедрялись новые аппараты и технологические схемы для обеспечения большей его эффективности: трубчатые печи, ректификационные колонны, проведение крекинга в двух печах (мягкий крекинг исходного сырья с последующим жестким крекингом более термостойких фракций) с рециркуляцией. Продуктами термического крекинга являются газ (преимущественно метан, этан и до 30% непредельных углеводородов) и жидкие продукты, в частности, крекинг-бензин, обладающий невысоким октановым числом (60–65 п.), которое может быть увеличено за счет увеличения глубины превращения сырья и, следовательно, увеличения содержания ароматических углеводородов в бензине. На сегодняшний день процесс термического крекинга практически не применяется из-за низкого качества получаемых продуктов, оставшиеся установки демонтируются.

В результате развития процесса термического крекинга были разработаны два процесса, применяемые в настоящее время.

В и с б р е к и н г. Висбрекинг (от *англ.* viscosity breaker) является подвидом «мягкого» термического крекинга. Его основным назначением является снижение вязкости нефтяных остатков. Процесс проводится при более мягких по сравнению с термическим крекингом условиях: давление 1–5 МПа и температура до 500°С. Существуют две конфигурации висбрекинга: печной и с выносной камерой. В технологии печного висбрекинга сырье претерпевает превращение непосредственно в змеевиках трубчатой печи. Время реакции составляет 1,5–2 мин. В случае висбрекинга с выносной камерой подогретое сырье после печи дополнительно направляется в так называемую сокинг-камеру, в результате чего время реакции составляет 10–15 минут. Такая схема характеризуется большей эффективностью и управляемостью процесса. После разделения продуктов на фракционирующей колонне получают газ, бензин, легкий газойль и остаток. Висбрекинг-остаток — основной продукт процесса, используемый в качестве котельного топлива. Бензин и легкий газойль для дальнейшего применения требуют гидрирования, что значительно повышает их себестоимость. В настоящее время процесс висбрекинга востребован на заводах, где отсутствуют установки глубокой переработки остатков. Также существует потенциал для модернизации висбрекинга с целью максимизации выхода дистиллятных фракций, которые затем могут быть использованы в качестве сырья для процесса каталитического крекинга и гидрокрекинга.

К о к с о в а н и е. Коксование осуществляется при давлении близком к атмосферному (0,1–0,5 МПа) и температуре 480–560°С, в качестве сырья используются тяжелые нефтяные остатки. Основным продуктом процесса — кокс, находящий применение как топливо или конструкционный материал для электродной промышленности. Процесс коксования реализуется на установках периодического, замедленного и непрерывного коксования.

Периодическое коксование является наиболее старым способом, в котором применяется горизонтальный цилиндрический аппарат, обогреваемый открытым огнем. После загрузки сырья в куб начинается его нагрев со скоростью 10–30°С/ч до 450–460°С. Общий выход кокса может составлять вплоть до 50%, однако такие установки обладают низкой производительностью и требуют большого объема ручного труда. Установки в настоящее время являются технически устаревшими и экономически невыгодными.

Современной и наиболее распространенной технологией является *замедленное коксование*, отличающееся тем, что сырье нагревается в печи до 500°С, после чего направляется в необогреваемую камеру, где оно находится длительное время. Общее время цикла составляет 48 часов; на установках замедленного коксования обычно имеются 4 выносные камеры, работающие по циклическому графику со сдвигом, что позволяет проводить процесс коксования в целом непрерывно. Выгрузка кокса из камер осуществляется с помощью гидрорезаков. Выход кокса на установках замедленного коксования составляет 25–38 масс. %; возможно получение анизотропного электродного кокса.

Непрерывное коксование в псевдооживленном слое (термоконтактный крекинг — ТТК), в отличие от других видов коксования, направлено на производство жидких топливных фракций. Процесс освоен компанией Exxon Research & Eng. Co и используется за рубежом в конфигурациях с частичным выводом кокса (Fluidcoking) или с его газификацией (Flexicoking). В первом случае реакторный блок установки содержит два аппарата — реактор и коксонагреватель, работающие по принципу псевдооживленного слоя, между которыми непрерывно циркулирует кокс-теплоноситель. Прогретое до 300–350°С сырье подают в реакционную зону под уровень псевдооживленного слоя кокса. Образующийся кокс с низа реактора поступает в коксонагреватель, где его частично выжигают для обеспечения теплоты для реакции коксования и частично выводят. Технология Flexicoking представляет собой Fluidcoking, дополненный блоком газификации, в который поступает кокс, выведенный с коксонагревателя, в результате чего кокс практически полностью превращают в топливный газ. Установки такого типа строятся редко, в основном под специальные цели, т. к. качество жидких продуктов коксования совершенно неудовлетворительное, что влечет за собой необходимость их дальнейшего облагораживания.

Гидроконверсия. Альтернативным термическому способу переработки тяжелых остатков является термогидрокаталитический подход, представленный технологией гидроконверсии остаточных нефтяных фракций. Этот процесс осуществляется в диапазоне температур от 320°С до 460°С, давления 15–30 МПа и в среде водорода. Катализаторы процесса, как правило, содержат никель, кобальт, молибден, вольфрам в качестве гидрирующего компонента, цеолиты или кристаллические алюмосиликаты в качестве кислотного компонента и разнообразные промоторы, например, редкоземельные металлы. Благодаря своей гибкости, процесс гидроконверсии (или гидрокрекинга) пригоден для переработки различного сырья, в частности, переработка тяжелых нефтяных остатков названа глубоким гидрокрекингом нефтяного сырья. На практике эта технология применяется в различных вариантах: в реакторах с неподвижным слоем катализатора, в режиме трехфазного «кипящего» слоя сырья и катализатора, а также в виде суспензии наноразмерных частиц катализатора в сырье, поступающем в реактор.

Гидроконверсия гудрона в неподвижном слое катализатора. Хотя установки с неподвижным слоем катализатора являются наиболее простыми по своему аппаратурному оформлению, они имеют ряд недостатков:

- высокие требования к исходному сырью: содержание асфальтенов не более 1%, азота не более 1500 ppm, металлов не более 50 ppm;
- глубина превращения гудрона не превышает 60%.

Технология реализована в промышленности компаниями UOP, BASF для переработки легкого сырья.

Гидроконверсия гудрона в трехфазном слое катализатора. Основным отличием данной технологии от гидроконверсии с неподвижным слоем катализатора является проведение процесса в специальном аппарате, в котором катализатор поддерживается в псевдооживленном состоянии потоками исходного сырья и газопродуктовым потоком. За счет «подвижности» катализатора достигается его более равномерная дезактивация и появляется возможность поддержания постоянной активности за счет непрерывной частичной замены отработанного катализатора на свежий. На мировых НПЗ процесс гидроконверсии гудрона в трехфазном слое катализатора представлен технологиями H-Oil (Axens) и LC-Fining (Lummus). Технология позволяет перерабатывать практически любые виды остатков, однако глубина превращения сырья обычно ограничена 80–85%.

Гидроконверсия гудрона в движущемся слое катализатора. Недостаточная глубина переработки гудрона в установках с неподвижным или трехфазным слоем катализатора требует иного подхода к синтезу катализатора. Создаются технологии гидроконверсии гудрона, в которых размер зерна катализатора составляет 1–10 мкм, а в ряде случаев — еще меньше.

При схожем аппаратурном оформлении с технологией гидроконверсии в трехфазном слое переход к ультрадисперсным катализаторам позволяет увеличить глубину превращения гудрона до 90–95% при снижении давления водорода в системе вплоть до 7–10 МПа. Высокая активность и стойкость к дезактивации катализатора позволяют отказаться от использования носителя в его составе; ультрадисперсные катализаторы гидроконверсии представляют собой оксиды и сульфиды переходных металлов — железа, молибдена, вольфрама.

В настоящее время существует ряд технологий этого процесса, разработанных компаниями Axens, Lummus, UOP, Eni, ИНХС РАН и ВНИПИНефть в вариантах «кипящего» слоя и движущегося суспендированного в сырье катализатора. Общий технологический уровень готовности — опытно-промышленные испытания.

Роль процесса гидроконверсии гудрона на современном НПЗ весьма значительна: несмотря на достаточно большие сопутствующие капиталозатраты, они являются практически безальтернативными путями превращения малоценных гудронов и мазутов в высококачественные компоненты моторных топлив, отвечающие экологическим требованиям.

Благодаря современным разработкам по увеличению глубины переработки сырья и активности катализатора, термогидрокаталитические процессы претерпевают этап бурного развития. Эти процессы в будущем способны полностью заместить устаревающие термические процессы конверсии тяжелых нефтяных остатков (термический крекинг, висбрекинг, коксование) в области максимального извлечения легких высококачественных продуктов из нефти.

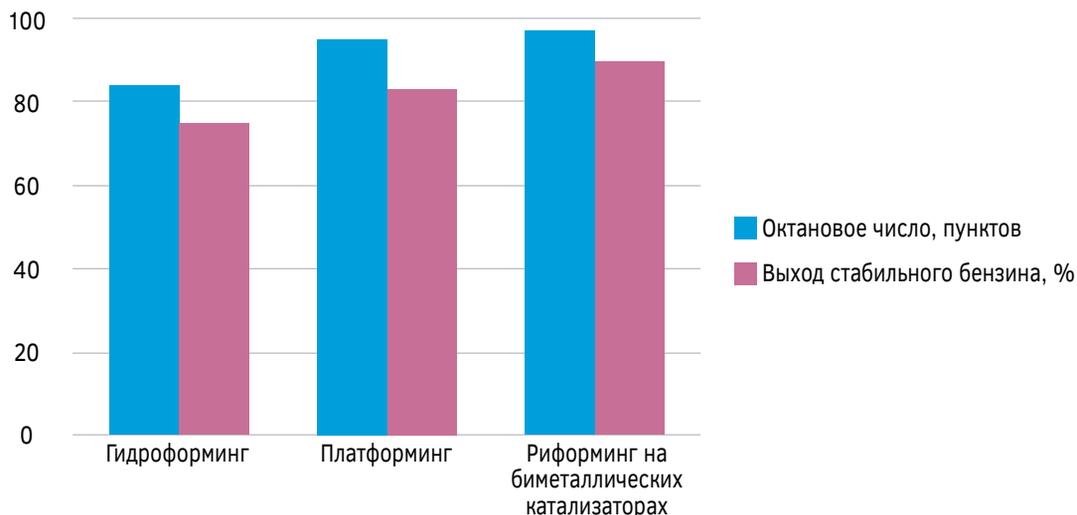


Рис. 6.12. Сравнение показателей трех поколений технологии каталитического риформинга

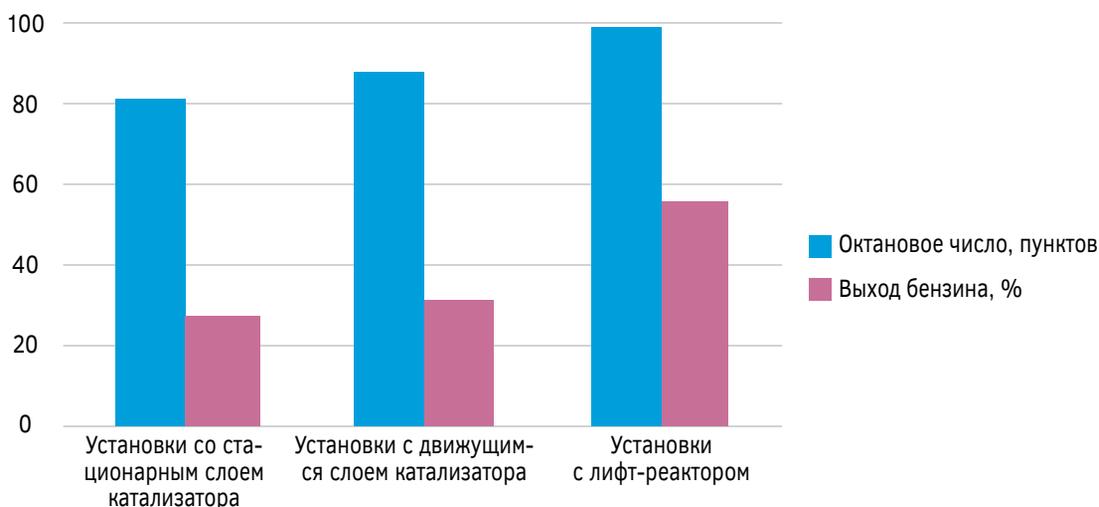


Рис. 6.13. Сравнение показателей трех поколений технологии каталитического крекинга

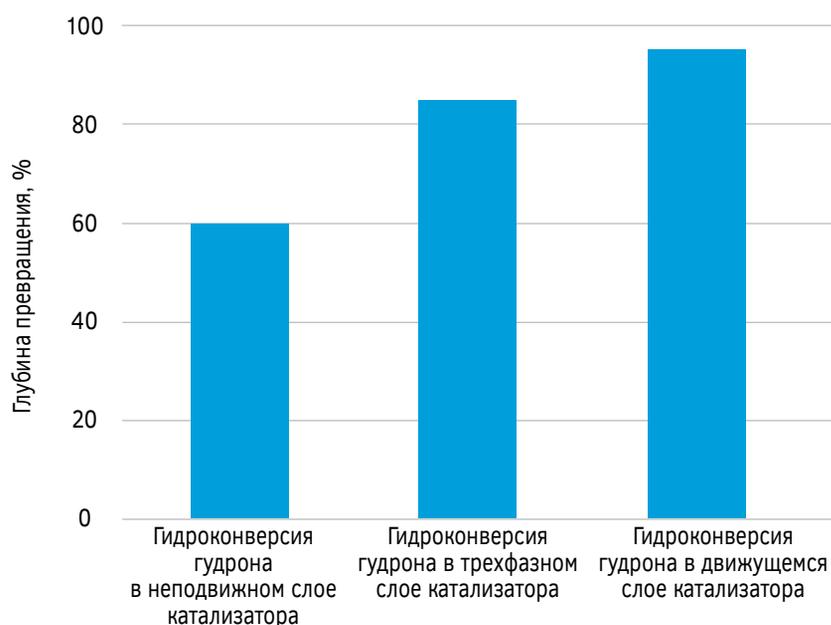


Рис. 6.14. Сравнение показателей трех поколений технологии гидроконверсии нефтяных остатков

Процессы производства масел

Все процессы производства масел можно разделить на два типа: процессы, улучшающие эксплуатационные свойства масел, и процессы, улучшающие их товарный вид.

Процессы очистки избирательными растворителями

Процессы первого типа по существу основаны на общей технологии очистки избирательными растворителями, поэтому их можно рассмотреть совместно. Технология была разработана в 1920–1930-х гг. и заключалась в обработке масла тем или иным растворителем для удаления нежелательных компонентов:

- обработка пропаном позволяет экстрагировать из вакуумных остатков тяжелые масляные фракции (процесс деасфальтизации) за счет удаления асфальтенов и смол;
- обработка фенолом или фурфуролом удаляет из масла полициклические ароматические углеводороды, азот- и серосодержащие соединения, что приводит к улучшению вязкостных характеристик масла (процесс селективной очистки);
- обработка масел парным растворителем типа толуол-ацетон способствует удалению из масла алканов нормального строения, что приводит к улучшению низкотемпературных характеристик масла (процесс депарафинизации).

Первоначальная технология состояла в трехкратной обработке масла свежим растворителем с промежуточным разделением рафината и экстракта. Смешение с растворителем осуществлялось в емкостях с перемешиванием, отстаивание смеси — в пустотелых сепараторах. Такая схема характеризуется невысокой степенью очистки и необходимостью применения большого избытка растворителя по отношению к маслу.

Развитие технологии ректификации привело к переходу на *новый этап технологии* — осуществление экстракции в специальных экстракционных колоннах. За счет наличия контактных устройств внутри колонны удалось существенно повысить степень извлечения ценных компонентов масла и снизить избыток растворителя, за счет чего мощность единичных установок увеличилась до 500–600 тыс. т/год. Технология очистки избирательными растворителями с применением экстракционных колонн и по сей день является базовой в блоке производства масел.

Процессы улучшения товарного вида масел

Адсорбционная очистка. Исторически очистка нефтепродуктов адсорбентами применяется с 1910-х гг., для масел и парафинов метод применялся вплоть до 1970-х гг. Технологически контактная очистка представляет собой фильтрование масла через фильтр колонного типа, заполненный активированной глиной — монтмориллонитом, опоком, трепелом и т. д. Глина прочно сорбирует асфальто-смолистые и гетероциклические соединения, а также полициклические углеводороды, в результате чего масло светлеет, у него исчезает запах, снижается его коксуемость. Очистка проводится при температурах порядка 110–300°С в зависимости от масла расход глины составляет 3–20%.

К недостаткам контактной доочистки относят высокую трудоемкость и длительность вспомогательных операций, низкую производительность установок и невозможность глубокой очистки масел. Кроме того, в процессе очистки образуется большое количество отходов глины, загрязненной маслом. В настоящее время установки по подобной технологии не работают и не строятся.

Гидроочистка

Технология гидроочистки масляных фракций аналогична таковой для топливных дистиллятов. Температура гидроочистки для масел составляет 320–350°С, давление 4 МПа, кратность циркуляции водородсодержащего газа 200–500 нм³/м³ сырья. Процесс проводится по одноступенчатой схеме, основным продуктом является светлое очищенное масло с коксуемостью до 0,4% и содержанием серы не выше 0,7%. Удельные операционные затраты на очистку масла несколько ниже, чем в случае адсорбционной очистки, что и обусловило широкое внедрение технологии гидроочистки взамен контактной доочистки.

Гидрокрекинг/гидроизомеризация

Гидрокрекинг масел применяется для облагораживания высоковязких остаточных масляных фракций. Условия гидрокрекинга соответствуют таковым для процесса глубокого гидрокрекинга вакуумного дистиллята — температура 370–425°С, давление 12–20 МПа, кратность циркуляции водородсодержащего газа 600–1200 нм³/м³ сырья. Основным отличием процесса является катализатор — в случае гидрокрекинга масла он подбирается таким образом, чтобы исключить избыточный крекинг и повысить выход маловязкого масляного продукта. В качестве катализаторов используются сульфиды молибдена, вольфрама, иммобилизованные на активированных оксидных носителях. Выход высокоиндексного масла может составлять вплоть до 50% в расчете на исходный деасфальтизат.

Гидрокрекингу также подвергается парафин с целью выработки дополнительного количества масла. Гидрокрекинг парафина в этом случае называют гидроизомеризацией; давление в процессе несколько меньше, чем в гидрокрекинге (2,0–4,2 МПа). Выход изопарафинового масла обычно не превышает 40–45%.

Процессы газопереработки

В течение последнего столетия мировая газопереработка прошла несколько циклов технологического развития: от сравнительно простых газобензиновых установок до современных высокотехнологичных газохимических процессов.

Первый цикл: первые процессы переработки природного и попутного нефтяного газа — компримирование, сепарация, масляная абсорбция. Производство подготовленного к транспортированию по трубопроводам природного газа, газового бензина.

Второй цикл: низкотемпературная сепарация, процесс Клауса. Производство сжиженных газов, серы.

Третий цикл: низкотемпературная абсорбция, низкотемпературная конденсация, ожижение гелия. Производство этана, ШФЛУ, жидкого гелия, моторных топлив.

Четвертый цикл: газохимические GTL-технологии. Производство синтез-газа (смеси монооксида углерода и водорода) и множества продуктов на его основе, включая метанол, диметилвый эфир, синтетическую нефть, продукты синтеза Фишера-Тропша.

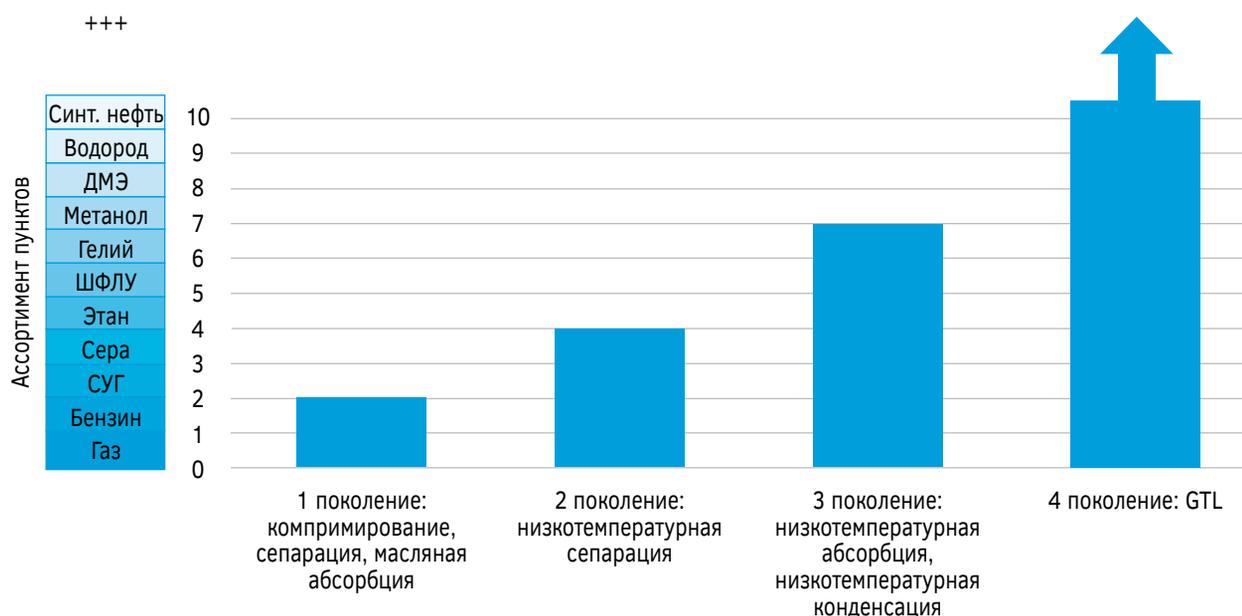


Рис. 6.15. Сравнение поколений технологий газопереработки

РОЛЬ НЕФТЕГАЗОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В ГЛОБАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКЕ

Нефть является важнейшим полезным ископаемым ресурсом для человека, значение которого сложно переоценить, настолько прочно она вошла практически во все области нашей жизни. Нефтяные топлива обеспечивают мировую экономику энергией в объеме более $200 \cdot 10^{15}$ ВТУ, что составляет более 30% общемирового потребления энергии. Более 90% двигателей транспортных средств сегодня работают на нефтяных топливах.

Однако применение нефти не ограничивается производством моторных топлив и смазочных материалов. Строительные материалы, лаки, краски содержат нефтяные растворители и нефтеполимерные смолы. Нефтепродукты являются исходным сырьем для производства пластмасс и резин, из которых изготавливается огромное количество предметов обихода.

По мере развития человечества спрос на «черное золото» возрастает, ежегодный объем добываемого нефтяного сырья в мире в августе 2018 г., согласно Международному энергетическому агентству, достиг рекордной отметки в 100 млн баррелей в сутки. В обозримом будущем нефтяная промышленность будет по-прежнему оказывать серьезное воздействие на мировую экономику и сохранять позиции мощной индустрии.

Объем мирового экспорта нефтепродуктов превышает 570 млрд долларов. Структура экспорта и импорта продуктов нефтепереработки представлена на рис. 6.16 и 6.17.

Природный газ имеет особо важное значение для российской и мировой экономики, занимая второе место после нефти в глобальном энергопотреблении. По оценкам, опубликованным в статистическом обзоре мировой энергетики³⁷, запасы природного газа в России являются наибольшими в мире и на конец 2018 г. насчитывали 38,9 трлн м³, что

³⁷ BP Statistical Review of World Energy. — June 2018. — URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf> (accessed: 20.05.2019).

составляет 19,8% от мировых запасов. К странам с наибольшими запасами природного газа относятся также Иран, Катар, Туркменистан, США, Саудовская Аравия, Венесуэла, ОАЭ, КНР, Нигерия. Мировое производство природного газа в 2018 г. составило 3,87 трлн м³. Объем мирового экспорта трубопроводного и сжиженного природного газа составляет 107 и 95 млрд долларов соответственно. Глобальный экспорт и импорт трубопроводного и сжиженного природного газа проиллюстрирован на рис. 6.18.



Рис. 6.16. Структура мирового экспорта нефтепродуктов

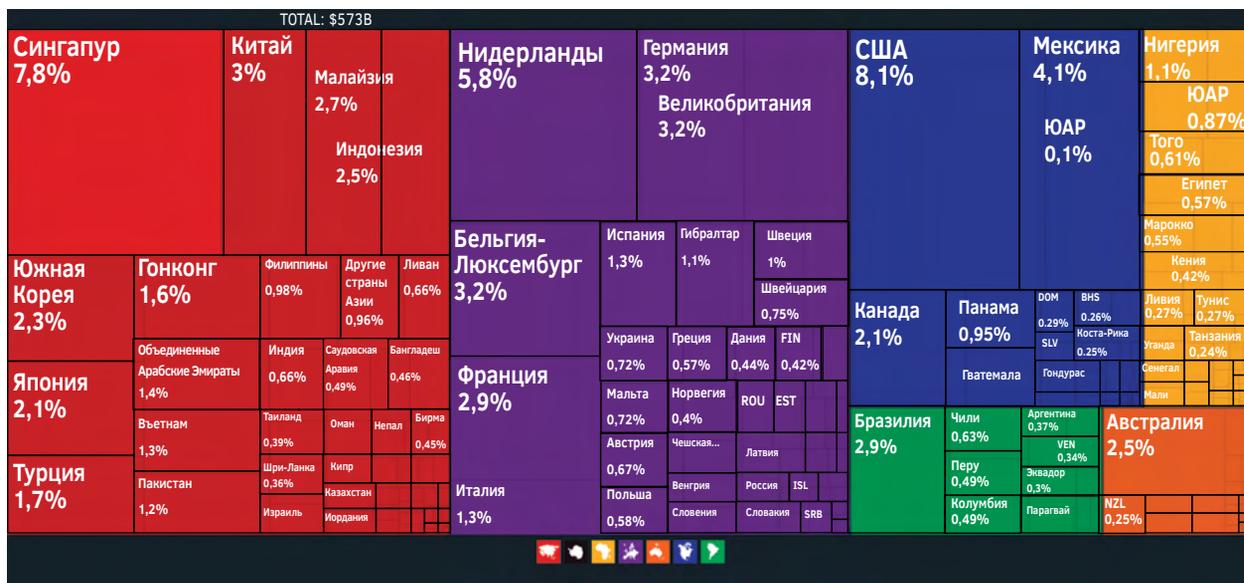


Рис. 6.17. Структура мирового импорта нефтепродуктов

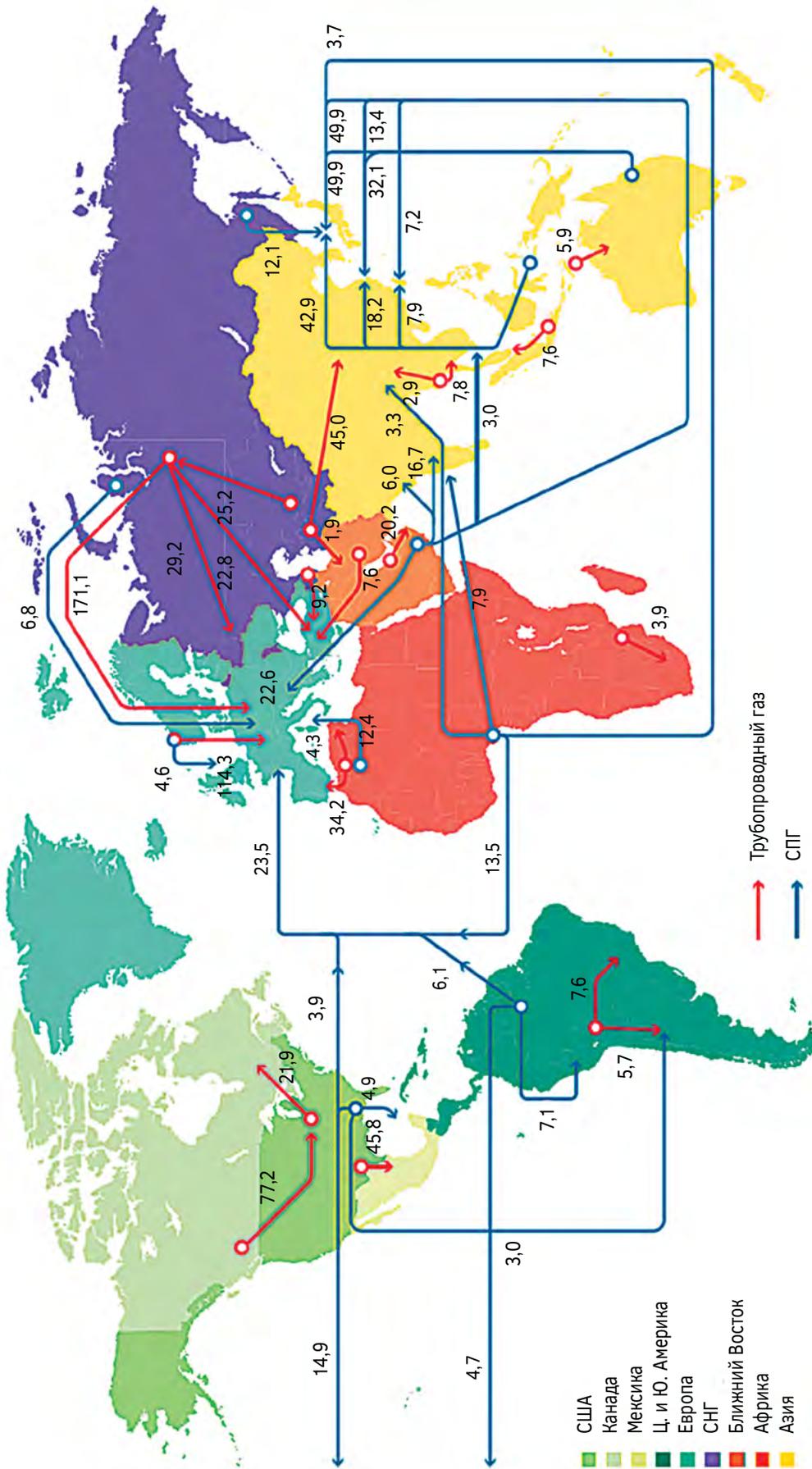


Рис. 6.18. Мировой экспорт и импорт трубопроводного и сжиженного природного газа, млрд м³

ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ

Газопереработка

В настоящее время основной объем природного газа применяется в качестве топлива, и лишь малая его часть используется как сырье для синтеза ценных химических продуктов. В качестве возможных перспективных вариантов квалифицированного использования природного и попутного нефтяного газов наиболее часто рассматриваются технологии их конверсии в жидкие углеводороды, получившие общее название GTL (gas-to-liquids), или в малотоннажную наукоемкую продукцию с высокой добавленной стоимостью. Предпосылками развития технологий GTL являются необходимость расширения сырьевой базы, необходимость утилизации попутных нефтяных газов нефтяных месторождений, необходимость вовлечения труднодоступных, низконапорных газовых месторождений, возможность обеспечения удаленных территорий топливом из местного сырья вместо «северного завоза» нефтепродуктов, а также возможность получения моторных топлив, отвечающих самым жестким экологическим требованиям.

Технологии GTL традиционно включают в себя три стадии: конверсию природного или попутного нефтяного газа в синтез-газ, представляющий собой смесь водорода и монооксида углерода; получение из синтез-газа углеводородов или оксигенатов; разделение и конечную переработку продуктов.

Процесс получения синтез-газа путем паровой конверсии природного газа широко применяется в промышленности при производстве аммиака, метанола, водорода, однако является крайне энергозатратным, из-за чего на эту стадию приходится до 70% затрат при получении продуктов GTL. Реже используются метод парциального окисления природного газа либо его комбинация с паровой конверсией, для которого требуется дорогостоящее производство кислорода и обеспечение повышенных мер безопасности, и метод углекислотной конверсии природного газа, также не лишенный недостатков. Для всех традиционных способов получения синтез-газа из попутного нефтяного газа требуется предварительное удаление из сырья этана и более тяжелых углеводородов. Одним из перспективных способов получения синтез-газа является окислительная конверсия природного или попутного нефтяного газа с отдельной подачей сырья и окислителя. Такая технология предусматривает контакт сырья с непрерывно циркулирующим по установке оксиднометаллическим катализатором с получением водорода и монооксида углерода и параллельным окислением катализатора в отдельном аппарате кислородом воздуха³⁸. За счет высокой взрывобезопасности, удобного мольного отношения водорода к монооксиду углерода в продуктах, отсутствия необходимости подвода тепла, предварительной конверсии сырья, разделения воздуха, а также возможности получения технического азота данная технология позволяет снизить расходы на получение продуктов GTL. Важной перспективной областью применения рассматриваемой технологии получения синтез-газа является водородная энергетика, основанная на использовании водорода в качестве сырья энергетических установок на основе топливных элементов. Такие установки применяются как в стационарном исполнении, так и на транспорте. Следует отметить, что синтез-газ можно получить из любого углеродсодержащего сырья, включая уголь, биомассу, твердые бытовые и промышленные отходы, нефтешламы. Тогда в зависимости от типа исходного сырья процесс получения жидких углеводородов может именоваться как CTL (coal-to-liquids), BTL (biomass-to-liquids), либо иметь общее название XTL (anything-to-liquids).

³⁸ Герзелиев И. М., Усачев Н. Я., Попов А. Ю., Хаджиев С. Н. Парциальное окисление низших алканов активным решеточным кислородом оксиднометаллических систем. Сообщение 2. Синтез контактов-оксидантов и получение синтез-газа на пилотной установке с лифт-реактором // Нефтехимия. — 2012. — Т. 52, № 5. — С. 339–347.

В качестве второй стадии технологии GTL могут быть реализованы синтез Фишера-Тропша, получение диметилового эфира или метанола.

Синтез Фишера—Тропша представляет собой процесс превращения синтез-газа в углеводороды с широким диапазоном молекулярных масс в присутствии железных или кобальтовых катализаторов. Продуктами синтеза Фишера-Тропша являются углеводородные газы C_2 – C_4 , α -олефины, жидкие углеводороды C_5 – C_{10} , керосиновая и дизельная фракции, церезин. Дизельное топливо, получаемое на основе продуктов синтеза Фишера-Тропша, отличается высоким цетановым числом и практически не содержит соединений серы, но имеет достаточно высокую температуру застывания. В случае если жидкие продукты не подвергают разделению, такую смесь жидких углеводородов C_5 – C_{19} называют синтетической нефтью. Получаемая в результате переработки попутного нефтяного газа на модульных установках высококачественная синтетическая нефть может быть закачана в трубопровод вместе с основным потоком сырой нефти, транспортируемой потребителю. Перспективы развития технологии синтеза Фишера-Тропша связаны с использованием сларри-реакторов и наноразмерных катализаторов, синтезируемых непосредственно в зоне реакции³⁹.

Другим вариантом второй стадии технологии GTL может быть получение из синтез-газа оксигенатов: метанола или диметилового эфира. Метанол может быть использован как самостоятельный товарный продукт, как сырье органического синтеза или в процессах получения синтетического бензина или олефинов. Диметиловый эфир является универсальным продуктом, который может быть использован как высококачественное дизельное топливо, бытовое топливо, пропеллент, а также в качестве сырья при получении олефинов, синтетической нефти, синтетического бензина. Традиционно диметиловый эфир получают из синтез-газа в две стадии с промежуточным образованием метанола. Развитие технологии получения диметилового эфира направлено на проведение процесса в одну стадию на бифункциональном катализаторе⁴⁰.

Среди перспективных процессов газопереработки и газохимии можно выделить технологии окислительной димеризации метана в этилен⁴¹, технологии окислительного дегидрирования этана в этилен⁴², мембранные технологии разделения природного газа, технологии получения новых строительных и дорожных материалов с использованием серы, а также технологии извлечения углеводородов из газовых гидратов (клатратов), запасы которых на два порядка превышают запасы традиционного природного газа.

Нефтепереработка

Нефтяная отрасль непрерывно развивается с целью максимально эффективного извлечения нефтяного сырья и его переработки с получением как можно большего количества ценных продуктов. В связи с этим ведется постоянная разработка новых месторождений, совершенствование процессов и катализаторов переработки нефти. Мировое потребление нефти растет практически непрерывно, ежегодно увеличиваясь в среднем на 1,8%. На фоне непрерывно растущего потребления нефти и сопутствующего истощения запаса ресурса в наше время и в будущем ожидается возрастание вклада переработки «нетрадиционного» нефтяного сырья: тяжелых и сверхтяжелых нефтей, нефтяных песков и природных битумов,

³⁹ Куликова М. В., Хаджиев С. Н. Наноразмерные металлсодержащие дисперсии как катализаторы синтеза Фишера—Тропша в трехфазных сларри-реакторах // Нефтехимия. — 2017. — Т. 57, № 6. — С. 796–799.

⁴⁰ Хаджиев С. Н., Магомедова М. В., Пересыпкина Е. Г. Выбор схемного решения GTL-процесса для технологии ИНХС РАН // Нефтехимия. — 2016. — Т. 56, № 6. — С. 567–577.

⁴¹ Дедов А. Г. и др. Окислительная конденсация метана в этилен: влияние способа приготовления на фазовый состав и каталитические свойства композитных материалов Li-W-Mn-O-SiO₂ // Нефтехимия. — 2015. — Т. 55, № 2. — С. 171–176.

⁴² Герзелиев И. М., Попов А. Ю., Остроумова В. А. Окислительное дегидрирование этана в этилен в системе с циркулирующим микросферическим оксиднометаллическим переносчиком кислорода 2. Получение этилена на пилотной установке с лифт-реактором // Нефтехимия. — 2016. — Т. 56, № 5. — С. 496.

синтетической нефти. Развитие технологий нефтедобычи и нефтепереработки обеспечило конкурентоспособность такого сырья. Нетрадиционные нефти уже внесли существенный вклад в формирование рынка, технологическую революцию в сфере разработки сланцевых нефтей в США и битуминозных песков Канады можно считать завершённой. Дальнейший потенциал для развития нетрадиционных источников нефти определяется либо трансфером этих технологий за пределы США и Канады, либо разработкой своих технологий, которые могли бы обеспечить Аргентина, Китай, Россия и многие другие страны, обладающие подходящей для этого ресурсной базой.

Утяжеление сырья нефтепереработки, ужесточение экологических требований к нефтепродуктам, тенденция к повышению степени использования нефтяного сырья предопределяют развитие соответствующих технологий. В области технологий синтеза и облагораживания моторных топлив следует ожидать:

- разработки новых высокоэффективных низкотемпературных катализаторов изомеризации, стойких к каталитическим ядам и наличию ароматических углеводородов в сырье;
- масштабного внедрения технологии алкилирования изобутана бутиленами на твердых катализаторах как экологически приемлемой технологии синтеза высокооктанового бензина;
- разработки новых катализаторов гидроочистки с повышенной стабильностью;
- снижение важности процесса каталитического риформинга и уменьшение доли риформатов в общем бензиновом пуле.

В области переработки тяжелых нефтяных остатков следует ожидать развития и внедрения технологии глубокой гидроконверсии на ультрадисперсных катализаторах, позволяющей в перспективе довести глубину переработки нефти до 95–98%. Значение термических методов переработки гудрона (висбрекинг, коксование) будет снижаться.

В перспективе будет происходить объединение нефтепереработки и нефтехимии, причиной чему будет не только их взаимосвязь по сырьевым потокам, но и рост нефтехимической направленности ряда традиционных процессов нефтепереработки. Так, вывод риформатов из применения в качестве компонента бензинов приведет к переуплотнению установок риформинга на производство ароматических углеводородов — ценного нефтехимического сырья. Рост выработки пропилена и бутиленов на установках каталитического крекинга уже сейчас приводит к их комбинированию с процессами нефтехимии — алкилирование, синтез эфиров, производство полипропилена.

Наконец, важнейшим направлением развития технологий (в особенности технологий глубокой переработки нефти) будет вовлечение в переработку нетрадиционного возобновляемого сырья. В качестве такого сырья могут выступать растительные масла, биоспирты, биоглицерин, а также продукты пиролиза биомассы. В настоящее время происходит создание научно-технической основы для соответствующих технологий.

СПИСОК ИСПОЛЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Агафонов, А. Ф. Опыт эксплуатации и пути реконструкции установок каталитического крекинга с шариковым катализатором / А. В. Агафонов, Д. М. Соскинд, Б. Т. Абаева // ХТТМ. — 1959. — № 4.
2. Все Закавказье: адресно-справочная книга на 1923 г. — Баку : Азполиграфтреста НКПТ, 1923. — 490 с.
3. Гараевская, И. А. Русский нефтепромышленник Виктор Иванович Рагозин / И. А. Гараевская // Нефтяное хозяйство. — 1999. — № 4.
4. Герзелиев, И. М. Окислительное дегидрирование этана в этилен в системе с циркулирующим микросферическим оксиднометаллическим переносчиком кислорода 2. Получение этилена на пилотной установке с лифт-реактором / И. М. Герзелиев, А. Ю. Попов, В. А. Остроумова // Нефтехимия. — 2016. — Т. 56, № 5. — С. 496.
5. Герзелиев, И. М. Парциальное окисление низших алканов активным решеточным кислородом оксиднометаллических систем. Сообщение 2. Синтез контактов-оксидантов и получение синтез-газа на пилотной установке с лифт-реактором / И. М. Герзелиев, Н. Я. Усачев, А. Ю. Попов, С. Н. Хаджиев // Нефтехимия. — 2012. — Т. 52, № 5. — С. 339–347.

6. Горный журнал. — 1908. — Т. 2, № 6. — С. 87.
7. Гулишамбаров, С. И. Материалы для производства фотогенового производства / С. И. Гулишамбаров // Горный журнал. — 1880. — Т. 4, № 10–11. — С. 327.
8. Гулишамбаров, С. И. Сравнительная статистика России в мировом хозяйстве и в ряду великих держав 1894–1904 гг. / С. И. Гулишамбаров. — СПб., 1907.
9. Дедов, А. Г. Окислительная конденсация метана в этилен: влияние способа приготовления на фазовый состав и каталитические свойства композитных материалов Li-W-Mn-O-SiO₂ / А. Г. Дедов, А. С. Локтев, Г. Д. Нипан, С. Н. Дорохов, С. Д. Голиков, Н. А. Спесивцев, И. И. Моисеев // Нефтехимия. — 2015. — Т. 55, № 2. — С. 171–176.
10. Дорогочинский, А. З. Изобретение крепостных крестьян братьев Дубининых (история зарождения нефтеперерабатывающей промышленности) / А. З. Дорогочинский, В. Т. Суманов. — Грозный : Чечено-Ингушское книжное изд-во, 1973. — 70 с.
11. Ергин, Д. Добыча. Всемирная история борьбы за нефть, деньги и власть / Д. Ергин ; пер. с англ. — 2-е изд. — М. : ДеНово, 2001.
12. Забрянский, Е. И. Детонационная стойкость и воспламеняемость моторных топлив (методы определения) / Е. И. Забрянский, А. П. Зарубин. — М. : Химия, 1974.
13. Ипатьев, В. Н. Каталитические реакции при высоких температурах и давлениях : 1900–1933 / В. Н. Ипатьев. — М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1936. — 774 с.
14. Казанкова, Э. Р. Энергетические ресурсы. Нефть и природный газ. Век уходящий / Э. Р. Казанкова, М. М. Судо // Россия в окружающем мире: 1998 : аналитический ежегодник. — М. : МНЭПУ, 1998. — С. 101.
15. Казанский, Б. А. Работы академика Н. Д. Зелинского и его школы в области химии углеводородов и органического катализа / Б. А. Казанский, А. Н. Несмеянов, А. Ф. Платэ // Ученые записки МГУ. — М., 1956. — Вып. 175.
16. Казанский, Б. А. Каталитические превращения углеводородов (Сборник избранных трудов) / Б. А. Казанский. — М. : Наука, 1968. — 694 с.
17. Капица, С. П. Общая теория роста человечества / С. П. Капица. — М., 2009. — 120 с.
18. Капустин, В. М. Проблемы развития нефтепереработки в России / В. М. Капустин // Нефть и капитал [сайт]. — URL: http://www.oilcapital.ru/technologies/2006/10/061059_98699.shtml (дата обращения: 20.05.2019).
19. Карпов, В. П. Очерки истории отечественной нефтяной и газовой промышленности / В. П. Карпов, Н. Ю. Гаврилова. — Тюмень : ТюмГНГУ, 2002. — 172 с.
20. Ким, Ю. С. Сланцевая революция / С. Ким // Химический журнал. — 2014. — № 4. — С. 28.
21. Кокорев, В. А. Экономические провалы / В. А. Кокорев. — М. : Директ-Медиа, 2014. — 267 с.
22. Крекинг нефтяных фракций на цеолитсодержащих катализаторах / под ред. С. Н. Хаджиева. — М. : Химия, 1982. — 280 с.
23. Куликова, М. В. Наноразмерные металлсодержащие дисперсии как катализаторы синтеза Фишера — Тропша в трехфазных сларри-реакторах / М. В. Куликова, С. Н. Хаджиев // Нефтехимия. — 2017. — Т. 57, № 6. — С. 796–799.
24. Лескова, Н. Человек-фабрика / Н. Лескова // Наука и жизнь. — 2013. — № 12. — С. 96–109.
25. Матузов, Г. Л. Развитие производства автомобильных бензинов в России / Г. Л. Матузов, А. Ф. Ахметов // Башкирский химический журнал. — 2007. — Т. 14, № 3. — С. 64–66.
26. Менделеев, Д. И. Нефтяная промышленность в Северо-Американском штате Пенсильвания и на Кавказе / Д. И. Менделеев. — СПб. : Тип. т-ва «Обществ. польза», 1877.
27. Народное хозяйство в 1913 году. Годовые обзоры важнейших отраслей народного хозяйства (год шестой). — Пг., 1914. — 687 с.
28. Тридцать лет деятельности «Товарищества нефтяного производства братьев Нобель». 1879–1909. — СПб., 1914.
29. Фукс, И. Нефтяная колыбель России / И. Фукс, В. Матишев // Нефть России. — 1995. — № 7–8.
30. Хаджиев, С. Н. Выбор схемного решения GTL-процесса для технологии ИНХС РАН / С. Н. Хаджиев, М. В. Магомедова, Е. Г. Пересыпкина // Нефтехимия. — 2016. — Т. 56, № 6. — С. 567–577.
31. Шилов, А. В. Товарищество нефтяного производства братьев Нобель и становление системы нефтепродуктообеспечения на Урале / А. В. Шилов // Вестник Пермского ун-та. Серия: История. — 2005. — № 5. — С. 108–114.
32. Энциклопедия советского экспорта : в 2 т. — 2-е изд., перераб. — М.: ОГИЗ РСФС, 1932. — Т. 2.
33. Boyle, P. C. The Derrick's Handbook of Petroleum : in 2 Vol. / P. C. Boyle. — Vol. I. — Oil City, 1898; Vol. II. — Oil City, 1900.
34. BP Statistical Review of World Energy. — June 2018. — URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf> (accessed: 20.05.2019).
35. Buonora, P. T. Almer McDuffie McAfee (1886–1972): Commercial catalytic cracking pioneer / P. T. Buonora // Bull. Hist. Chem. — 1998. — Vol. 21. — P. 12–18.
36. Council Directive 1999/32/EC of 26 April 1999 relating to a reduction in the sulphur content of certain liquid fuels and amending Directive 93/12/EEC // Official Journal of the European Communities. — 11 May 1999. — L121/13–L121/18.
37. Directive 2009/30/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 amending Directive 98/70/EC as regards the specification of petrol, diesel and gas-oil and introducing

- a mechanism to monitor and reduce greenhouse gas emissions and amend // Official Journal of the European Union. — 5 June 2009. — L 140/88–L 140/113. — URL: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0088:0113:EN:PDF> (accessed: 20.11.2019).
38. Directive 98/70/EC of the European Parliament and of the Council of 13 October 1998 relating to the quality of petrol and diesel fuels and amending Council Directive 93/12/EEC // Official Journal L 350. — 28 Dec. 1998. — P. 0058–0068.
 39. Encyclopedia of Chemical Processing and Design. — Vol. 13: Cracking, Catalytic to Crystallization / Ed. J. J. McKetta Jr. — Marcel Dekker, Inc., 1981. — 408 p.
 40. *Giddens, P. H.* Standard Oil Company (Indiana): Oil Pioneer of the Middle West / P. H. Giddens. — 1955. — 741 p.
 41. Greater Pittsburgh and Allegheny County, past, present, future / American Manufacturer and Iron World. — Pittsburgh, 1901.
 42. *Hansel, V.* U.S. Patent No. 2479110: Process of reforming a gasoline with an alumina-platinum-halogen catalyst. — Patented August 16, 1949. — URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/Oe/cd/cc/1d796d70700be8/US2479110.pdf> (accessed: 20.11.2019).
 43. International Statistical Year-Book : Economic and Financial Section / League of Nations. — Geneva, [1921–1944]. — URL: <https://wayback.archive-it.org/6321/20160901163315/http://digital.library.northwestern.edu/league/stat.html> (accessed: 20.11.2019).
 44. *Koottungal, L.* 2010 Worldwide Refining Survey / L. Koottungal // Oil & Gas Journal. — Dec. 6, 2010.
 45. *Moseley, C. G.* Eugene Houdry, catalytic cracking and World War II aviation gasoline / C. G. Moseley // J. Chem. Educ. — 1984. — V. 61. — P. 655.
 46. *Murray, T. J.* Dr Abraham Gesner: the father of the petroleum industry / T. J. Murray // Journal of the Royal Society of Medicine. — 1993. — V. 86, № 1. — P. 43–44.
 47. Oil and Gas Journal Annual Refiling Surveys 1950–1959.
 48. Oil and Gas Journal. — 1938. — Vol. 18/XI. — P. 95.
 49. OPEC Annual Report 2001. — URL: https://www.opec.org/opec_web/static_files_project/media/downloads/publications/AR002001.pdf (accessed: 20.05.2019).
 50. OPEC Annual Report 2003. — URL: https://www.opec.org/opec_web/static_files_project/media/downloads/publications/AR002003.pdf (accessed: 20.05.2019).
 51. *Owen, E. W.* Trek of the Oil Finders: A History of Exploration for Petroleum / E. W. Owen ; The American Association of Petroleum Geologists. — January 1, 1975. — 1647 p.
 52. *Russell, L. S.* A heritage of light / L. S. Russell. — Toronto : University of Toronto Press, 2002. — 344 p.
 53. *Scherzer, J.* Hydrocracking Science and Technology / J. Scherzer, A. J. Gruia. — New York ; Basel : CRC Press, 1996. — 305 p.
 54. *Self, F.* Refining Overview — Petroleum, Processes and Products / F. Self, E. Ekholm, K. Bowers // AIChE, 2000, Chapter 5.
 55. *Seymour, A.* The World Refining System and the Oil Products Trade / A. Seymour ; Oxford Institute for Energy Studies. — 1990.
 56. The Observatory of Economic Complexity [website]. — URL: <https://oec.world> (accessed: 20.05.2019).
 57. *Williamson, H.* The American Petroleum Industry: The Age of Illumination, 1859–1899 / H. Williamson, A. R. Daum. — Evanston, 1959.
 58. *Wright, W.* The Oil Regions of Pennsylvania / W. Wright. — New York : Harper & Brothers, 1865.

ПРОИЗВОДСТВО ЧУГУНА И СТАЛИ

Анатолий Владимирович Федаш

Московский государственный горный университет, проректор, доцент,
кандидат технических наук

Илья Сергеевич Курошев

Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики»,
начальник отдела металлургической, нефтегазовой и горнорудной промышленности

ВВЕДЕНИЕ

Металлы разделяются на цветные и черные. Черные металлы, по сути — это железо, с различным количеством углерода, и отличающимися кристаллическими решетками. К черным металлам относят стали и чугуны, которые, в свою очередь, имеют достаточно большое количество основных классов. При производстве чугунов и сталей различных типов используют именно черные металлы, добываемые из металлических руд. В экономике металлов черные металлы имеют широкое распространение (более 90%). От процентного содержания углерода зависит, какие свойства приобретет материал — чугуна или стали. Для повышения качества черного металла используются легирующие добавки (другие металлы и сплавы, а также химические элементы), которые улучшают свойства сплавов и придают им нужный оттенок характеристик в зависимости от его применения. Распространенными легирующими добавками являются:

- медь;
- кремний;
- хром;
- никель.

Классификация черных металлов

Классификация черных металлов построена на основании деления элементов по их химическому составу и свойствам. Содержание легирующих элементов определяет железо и его сплав. В свою очередь, определенное процентное содержание углерода в сплаве указывает, чугун это или сталь. Так чугуны содержат более 1,7% углерода, а стали от 0,2 до 1,7% углерода. Классификация черных металлов подразумевает деление на следующие классы:

- железные металлы;
- тугоплавкие;
- урановые;
- щелочноземельные;
- редкоземельные.

Также классификация черных металлов подразумевает отделение сталей легированных и нелегированных, которые еще называют углеродистыми. К углеродистым сталям относятся стали, в которых углерод является основным компонентом. Легированные имеют в наличии один или несколько легируемых элементов, которые оказывают большое влияние на свойства стали. Легированные стали очень широко применяются для изготовления ответственных деталей, несущих большую нагрузку, испытывающих разный температурный режим, сильное фрикционное воздействие. Применение такой стали распространено в машиностроении, тракторостроении, тяжелой промышленности и в других областях.

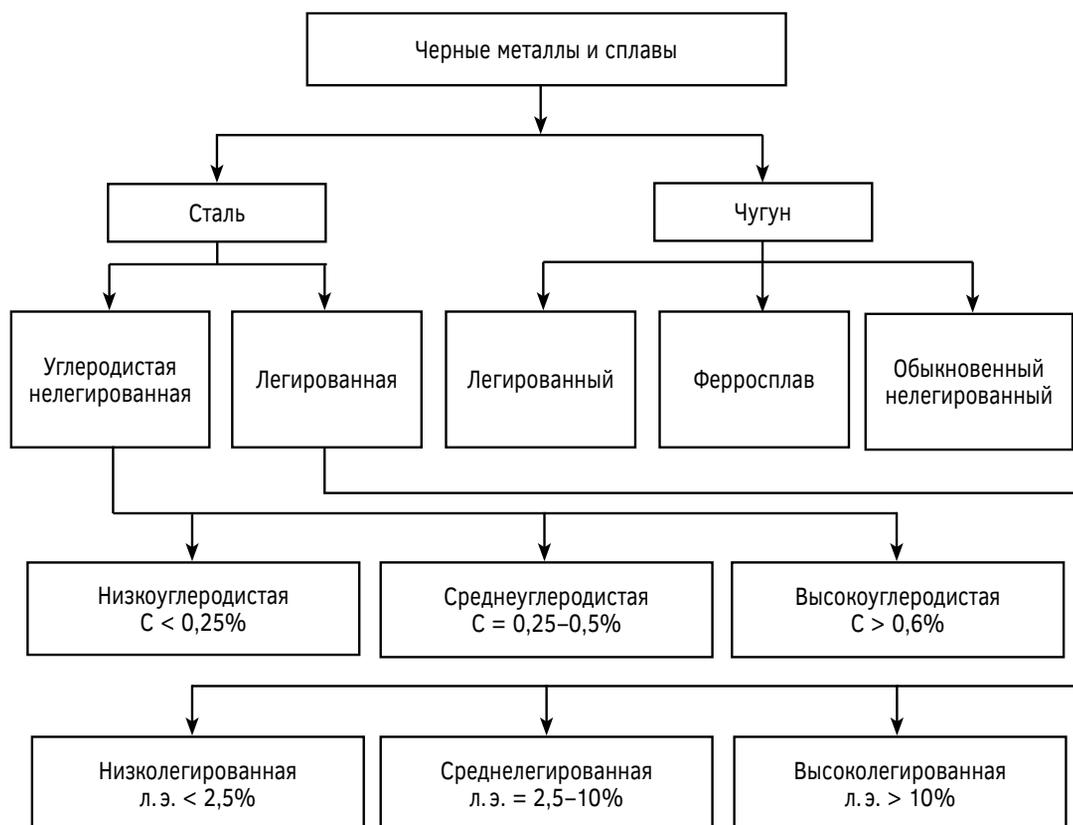


Рис. 7.1. Виды черных металлов

Виды черных металлов из стали имеют большое применение. Однако все виды стали по себе разные и имеют свое предназначение и область применения. Также различные виды черных металлов, в частности стали, пройдя термообработку, приобретают отличительные свойства. Многие сплавы хорошо поддаются прокатке, прессованию, успешно льются. Другие достаточно мягкие, и их можно обработать вручную. Такие виды черных металлов, как нержавеющая сталь, обладая нужными легирующими элементами, имеют очень высокую стойкость к коррозии, большую твердость и прочность. Данный вид стали успешно применяют в пищевой промышленности, медицине, для изготовления бытовых предметов, для производства турбин и др. Еще одним видом черного металла является чугун. Чугун — это сплав железа с углеродом, и его содержание больше чем в стали. Так как чугун имеет хорошие литейные свойства, то его в основном используют для литых деталей. Чугун подразделяется на виды:

- чугун литейный;
- чугун передельный;
- чугун антифрикционный;
- ковкий чугун;
- чугун низколегированный;
- чугун высоколегированный;
- чугун с шаровидным графитом;
- чугун с вермикулярным графитом для отливок.

Литейный чугун используют для литья, этому хорошо способствует пластинчатый графит. Ковкий обладает замечательной пластичностью, хорошо поддается ковке, откуда и взято название. Отдельные виды черного металла, к примеру, чугун с шаровидным графитом благодаря своей структуре шаровидного состояния применяют в изготовлении деталей, имеющих очень высокое качество.

Исходные материалы

Железорудное сырье. Железная руда состоит из рудного вещества и пустой породы. Рудным веществом чаще всего являются окислы, силикаты и карбонаты железа. Пустая порода обычно состоит из кварцита или песчаника с примесью глинистых веществ и реже из доломита или известняка. В зависимости от рудного вещества железные руды бывают богатыми, которые используют непосредственно, и бедными, которые подвергают обогащению. В доменном производстве применяют разные железные руды.

Красный железняк (гематит) содержит железо в виде его безводной окиси. Она имеет разную окраску (от темно-красной до темно-серой). Руда содержит много железа (45–65%) и мало вредных примесей. Восстановимость железа из руды хорошая.

Бурый железняк содержит железо в виде водных окислов. В нем содержится 25–50% железа. Окраска меняется от желтой до буро-желтой. Пустая порода железняка глинистая иногда кремнисто-глиноземистая.

Магнитный железняк содержит 40–70% железа в виде закиси-окиси железа. Руда обладает хорошо выраженными магнитными свойствами, имеет темно-серый или черный с различными оттенками цвет. Пустая порода руды кремнеземистая с примесями других окислов. Железо из магнитного железняка восстанавливается труднее, чем из других руд.

Шпатовый железняк (сидерит) содержит железо в виде углекислой соли. В этом железняке содержится 30–37% железа. Сидерит имеет желтовато-белый и грязно-серый цвет. Он легко окисляется и переходит в бурый железняк. Из всех железных руд он обладает наиболее высокой восстановимостью.

Марганцевые руды содержат 25–45% марганца в виде различных окислов марганца. Их добавляют в шихту для повышения в чугуне количества марганца.

Кокс. Для выплавки стали *главным топливом служит каменный уголь*. Добытый уголь содержит много примесей, которые могут вредно повлиять на будущий металл. И поэтому их необходимо удалить.

Уголь, как и руду, сначала размалывают в тончайший порошок. Потом этот порошок в специальной камере нагревают без доступа воздуха. Из угля выделяются газ и смола. Вместе с ними уходят и другие ненужные примеси, а сам угольный порошок спекается в плотную пористую массу, которую выталкивают из камеры на металлическую платформу и охлаждают водой. От резкого охлаждения масса разваливается на куски — **кокс**.

Далее руду, кокс и известь загружают в домну и выпускают готовый чугун.

Чугун. Руду, кокс и известь загружают в домну. При высокой температуре *кислород соединяется с углеродом кокса и отделяется железо* — получается *углекислый газ*. Оставшийся углерод занимает место кислорода и соединяется с железом — выпускается готовый чугун.

Чтобы ускорить плавку, в домну накачивают не просто воздух, а чистый кислород. Современные домны работают на природном газе. А это не только ускоряет плавку, но и значительно сокращает расход кокса. Что дает возможность получать более дешевый чугун.

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРЕДПРИЯТИЯ РОССИИ

Российская черная металлургия развивается в общемировой системе хозяйственных связей, и ее состояние в значительной степени зависит от тенденций развития мировой металлургии в целом, что позволяет рассматривать Россию как одного из глобальных игроков на мировом рынке металлопродукции.

Таблица 7.1. Регионы и наименования предприятий черной металлургии России

№ на карте	Регион	Предприятие
1	Краснодарский край	ООО «Абинский ЭлектроМеталлургический завод» (ООО «АЭМЗ») ООО «Новоросметалл»
2	Ставропольский край	ООО «Ставсталь»
3	Ростовская область	ПАО «ТАГМЕТ» ООО «Ростовский электрометаллургический завод» (ООО «РЭМЗ»)
4	Белгородская область	АО «ОЭМК»
5	Брянская область	ООО «ПК «Бежицкий сталелитейный завод»
6	Смоленская область	ОАО «Ярцевский металлургический завод» ГУП «Литейно-прокатный завод» (ГУП «ЛПЗ»)
7	Калужская область	ООО «НЛМК-Калуга»
8	Волгоградская область	АО «Волга-ФЭСТ» АО «ВМК „Красный Октябрь”» АО «Волжский трубный завод»
9	Липецкая область	ПАО «НЛМК»
10	Тульская область	ПАО «Тулачермет» ПАО «Косогорский металлургический завод» ПАО «Череповецкий металлургический комбинат» АО «Уральская сталь» ПАО «Надеждинский металлургический завод» АО «ЕВРАЗ НТМК» ПАО «Тулачермет» ОАО «Ревякинский металлургический завод»
11	Московская область	АО «МЗ «Электросталь» АО «Металлургический завод „Электросталь”»
12	Саратовская область	АО «Северсталь — Сортовой завод Балаково»
13	г. Санкт-Петербург	ООО «ОМЗ — Спецсталь»
13	Ленинградская область	ЗАО «Металлургический завод „Петросталь”»
14	Нижегородская область	АО «Выксунский металлургический завод» АО «ОМК — Сталь» ОАО «Кулебакский металлургический завод» АО «ОМКСталь»
15	Республика Татарстан	ЗАО «Камский металлургический комбинат „ТЭМПО”»
16	Кировская область	АО «Омутнинский металлургический завод»
17	Республика Башкортостан	АО «Белорецкий металлургический комбинат»
18	Челябинская область	ПАО «Челябинский металлургический комбинат» (ПАО «ЧМК») ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК») АО «Златоустовский электрометаллургический завод» ПАО «Ашинский металлургический завод» ПАО «Челябинский металлургический комбинат» ОАО «ММК-Метиз»
19	Пермский край	ОАО «Ижсталь» ООО «МЗ „Камасталь”» ОАО «Лысьвенский металлургический завод» ОАО «Нытвенский металлургический завод»
20	Свердловская область	ОАО «Первоуральский новотрубный завод» ПАО «Синарский трубный завод» ЗАО «Нижнесергинский метизно-металлургический завод» ООО «Верхнесалдинский металлургический завод» ООО «Староуткинский металлургический завод» ЗАО «Ревдинский метизно-металлургический союз» ООО «ВИЗ-Сталь»
21	Тюменская область	ООО «Завод УГМК Электросталь Тюмени»
22	Новосибирская область	ОАО «Новосибирский металлургический завод имени Кузьмина»
23	Кемеровская область	АО «ЕВРАЗ ЗСМК» ОАО «Гурьевский металлургический завод»
24	Хабаровский край	ОАО «Амурметалл»

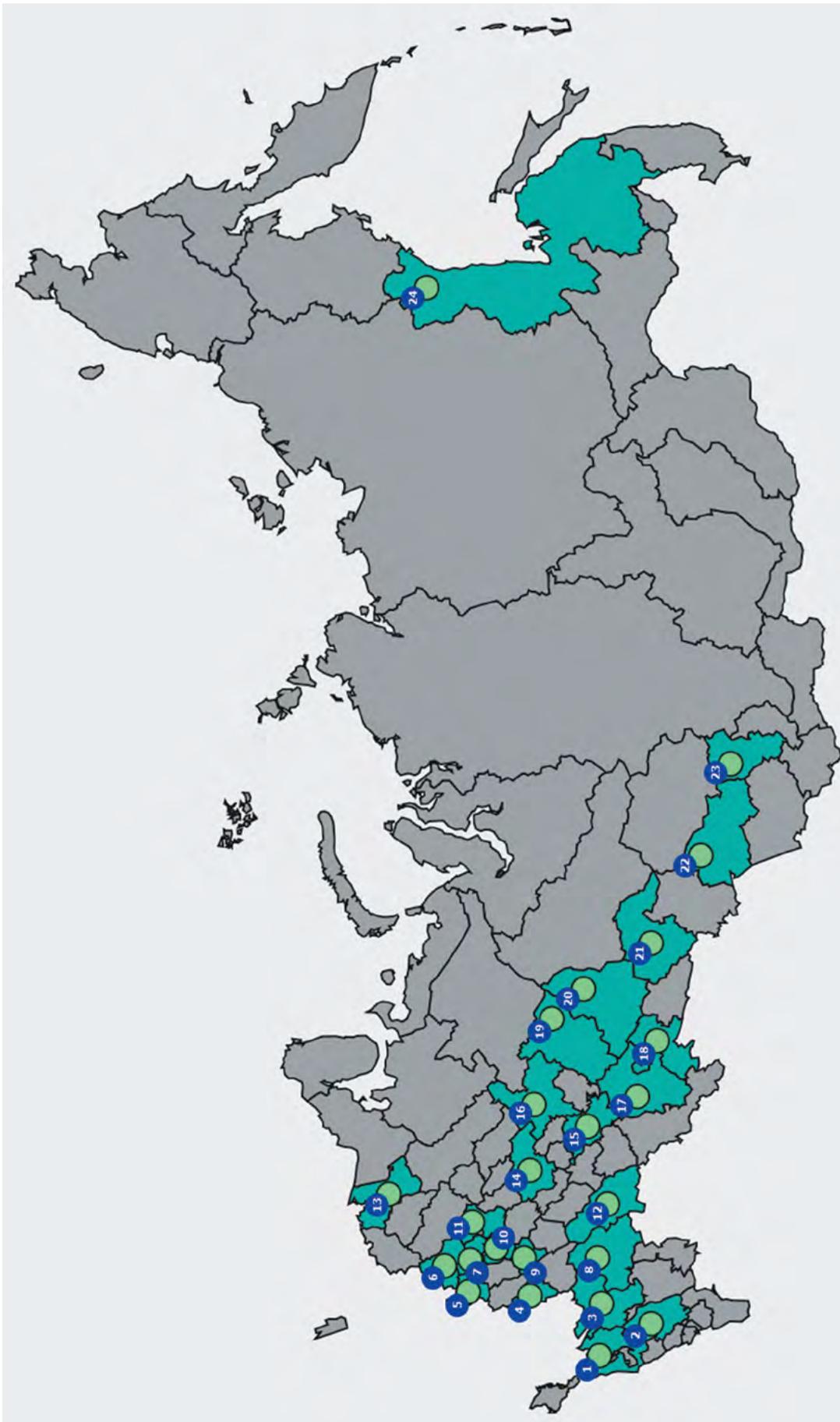


Рис. 7.2. Карта-схема размещения металлургических предприятий Российской Федерации

Отрасль «черная металлургия» состоит из комплекса предприятий по добыче и обогащению руд черных металлов, нерудных материалов, по производству чугуна, стали, проката, стальных труб, метизов, ферросплавов, огнеупоров, кокса, по заготовке и переработке лома и отходов, комплекса предприятий и производств вспомогательного назначения, а также научно-исследовательских и проектных организаций.

В структуру черной металлургии России входит свыше полутора тысяч предприятий, из которых более 70 являются градообразующими. Предприятия металлургии располагаются практически во всех федеральных округах, в 25 краях и областях. Регионы и наименования предприятий черной металлургии представлены в таблице. Географическая карта размещения металлургических предприятий России представлена на рис. 7.2.

В черной металлургии сформировалось десять крупных интегрированных холдингов вертикального и горизонтального типа, объединяющих предприятия по всей технологической цепочке производства от добычи угля и руды, их переработки до инфраструктурных подразделений, включая ломопереработку, энергетику, порты и железнодорожный транспорт. Крупные холдинги черной металлургии России приведены в табл. 7.2.

Таблица 7.2. Крупные холдинги черной металлургии России

Вертикально интегрированные холдинги	Горизонтально интегрированные холдинги
Производят металлопродукцию, начиная с добычи железорудного сырья	Производят металлопродукцию, в основном трубы стальные, начиная с производства стали
ПАО «Евраз Холдинг» ПАО «Северсталь» ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» ПАО «Металлоинвест» ПАО «Мечел» ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК») ООО УК «Промышленно-металлургический холдинг» («ПМХ»)*	ПАО «Трубная металлургическая компания» ПАО «Объединенная металлургическая компания» ПАО «ЧТПЗ»

* Холдинг осуществляет добычу и переработку железной руды, добычу угля и производство кокса, производство чугуна и порошковых материалов; в настоящее время строится сталеплавильный цех.

Такая интеграция позволяет уменьшить риски как на внутреннем, так и на внешнем рынках, оптимизировать инвестиционную политику и обеспечить собственную сырьевую безопасность. Холдинги активно развивают собственные сервисные службы по металлообработке и торговле готовой металлопродукцией в различных регионах страны и мира.

Предприятия холдингов производят 98% чугуна, более 90% стали и проката и 79% труб.

ИСТОРИЯ ЗАРОЖДЕНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Зарождение металлургической промышленности в мире

Техническое название железа и железных сплавов — черные металлы. Значение черных металлов вообще и стали в частности в народном хозяйстве огромно. Без использования стали не могли бы развиваться ни горная промышленность, ни транспорт, ни машиностроение, ни сельское хозяйство. За последние 60–100 лет во много раз увеличилось производство цветных металлов, особенно алюминия, однако доля черных металлов в мировом производстве продолжает оставаться преобладающей и почти неизменной — около 95% общего производства металлов. В течение многих столетий уровень экономической мощи

того или иного государства определялся в первую очередь количеством выплавленной стали. При этом основную массу составляли так называемые рядовые марки стали; доля качественных и высококачественных марок была невелика.

Основной примесью стали, в значительной мере определяющей ее свойства, является углерод. По содержанию углерода сплавы Fe-C делят на сталь и чугун. При содержании ниже 1,7–2% C сплав Fe-C называют сталью, а при > 1,7% C чугуном. Различают сталистые чугуны (от 1,7 до 2,8–3% C) и обычные чугуны (> 3% C). При высоких температурах сталь обладает высокой пластичностью, способностью коваться и прокатываться. Чугун этими свойствами не обладает. Чугун имеет температуру плавления, значительно более низкую, чем сталь, поэтому обладает хорошими литейными качествами и широко применяется в литейном производстве. В настоящее время выплавляют стали, содержащие, как правило, < 1,2% C, и чугуны с 3,5–4,5% C.

Наша цивилизация в том виде, в котором она сложилась, базируется на использовании железа как основного технического материала. Принято считать, что с железом человек впервые встретился, найдя метеорит. Косвенно об этом свидетельствуют названия железа, возникшие у древних народов: «небесное тело» (*древнеегипетск.*), «звезда, небесное тело» (*древнегреч.*), произошедшие от *sidus, sideris* (*лат.*) — звезда, звездный; *σίδηρος* (*греч.*) — звезда; *сидеролит* — железный метеорит; *siderurgie* (*фр.*) — черная металлургия. Шумеры называли железо «небесной медью». У коренных жителей Гренландии находили ножи, сделанные из метеоритного железа.

Первые письменные упоминания о железе, относящиеся к весьма отдаленным временам, встречаются в Библии, в поэмах Гомера. В Ветхом Завете (Бытие) упоминается потомок Каина Тувалкаин, «который был ковачом всех орудий из меди и железа».

В Библии, во 2-й Книге Царств, при описании походов царя Давида упоминаются железные топоры, железные молотилки.

В поэме «Дела и дни» одного из великих поэтов Древней Греции Гесиода (VIII–VII вв. до н. э.) есть миф о пяти веках, следовавших один за другим, согласно которому после золотого, серебряного, медного и бронзового веков наступает железный век и общую участь составляют печаль и забота, так как боги посылают людям вместе с металлами все новые бедствия.

По преданию, богатые рудами Алтайские горы были колыбелью многих местных алтайских народов, которые с глубокой древности почитали мастеров кузнечного ремесла, причисляя их к верховным божествам.

Воинственные кочевники из Средней Азии имели металлические доспехи и железное оружие. Своеобразная культура железа сложилась и в Китае, где, возможно, ранее, чем другие народы, научились получать жидкий чугун и делать из него отливки. До наших дней сохранились некоторые уникальные древние отливки из чугуна, например 60-тонный колокол, высотой 4 м и диаметром 3 м.

Известны уникальные изделия металлургов Древней Индии. В Дели стоит знаменитая Кутубская колонна массой 6 тонн, высотой 7,5 м и диаметром 40 см. Надпись на колонне гласит, что она сделана примерно в 380–330 гг. до н. э. Она сооружена из отдельных криц, сваренных в кузнечном горне. Больше удивление, чем размеры колонны, вызывает тот факт, что на ней нет ржавчины. В захоронениях Древней Индии найдено оружие из железа, изготовленное в середине первого тысячелетия до н. э.

Греческие мастера уже в древние времена использовали железо. В построенном зодчим Гермогеном около 200 г. до н. э. храме Артемиды барабаны мраморных колонн храма скреплены мощными железными дюбелями длиной 130 мм, шириной 90 мм и толщиной 15 мм.

В исторической литературе эпоху железного века делят на два периода: ранний (X–V вв. до н. э.) железный век (так называемая гальштатская культура по названию города в Австрии, в окрестностях которого были найдены железные предметы того времени) и поздний, или второй, железный век (V–II вв. до н. э. — начало нашей эры), соответствующий периоду,

от которого осталось много железных предметов (так называемая латенская культура — по месту в Швейцарии). Латенская культура связывается с кельтами, считавшимися мастерами изготовления различных орудий из железа. Большое переселение кельтов, начавшееся на рубеже V до н. э., способствовало распространению этого опыта на территории Западной Европы. От кельтского названия железа «изарнон» произошли немецкое «айзен» (*Eisen*) и английское «айрон» (*iron*).

«Железная революция» началась на рубеже I тысячелетия до нашей эры в Ассирии. Железные мечи научились изготавливать представители гальштатской культуры. С VIII в. до н. э. сварочное железо быстро стало распространяться в Европе, в III в. до н. э. оно вытеснило бронзу в Галлии, во II в. н. э. появилось в Германии, а в VI в. уже широко употреблялось в Скандинавии; племенами же, проживающими на территории будущей Руси (киммерийцами, а позже скифами и сарматами), железо использовалось еще до нашей эры. В Японии железный век наступил только в VII в. н. э. Известный популяризатор науки Айзек Азимов так описывает историю перехода человечества из бронзового века в железный.

Где-то около XV–XIV вв. до н. э. техника выплавки и науглероживания железа была разработана в кавказских предгорьях в Урарту. Эта страна находилась тогда под властью Хеттского царства, которое находилось на высшей точке своей мощи. Хеттские цари тщательно охраняли монополию на новую технику, ибо понимали ее важность. Вначале получали только маленькие партии железа, и в течение нескольких столетий оно стоило порой в сорок раз дороже серебра. Но еще до того, как выплавку можно было увеличить, а хеттам этим воспользоваться, им пришел конец. Хеттское царство было разрушено во время беспорядков, последовавших за движением «народов моря», и хеттская монополия на железо была нарушена. Технология выплавки железа быстро распространялась в том числе, конечно, в Ассирию, которая граничила с «железным царством» Урарту.

Торговля железом восстановила процветание Ассирии. Открылся путь для новых завоеваний.

Вторгшиеся в Грецию дорийские племена обладали железным оружием, именно поэтому они так легко покорили вооруженных бронзой ахейцев. Было железо и у «народов моря». Когда филистимляне захватывали ханаанское побережье, в сражениях они использовали железное оружие, но они были не настолько глупы, чтобы раскрывать секрет выплавки железа. Пока им удавалось хранить эту техническую тайну, израильтянам приходилось обороняться более примитивным оружием. Благодаря железу филистимляне не только легко закрепились на побережье, но и обложили данью ближайшие к ним племена. Около двух веков (до прихода к власти Давида в 1013 г. до н. э.) им удавалось господствовать над более многочисленными израильскими племенами

У алхимиков металлы носили названия планет: золото называлось Солнцем, серебро — Луной, медь — Венерой, олово — Юпитером, свинец — Сатурном, ртуть — Меркурием, а железо — Марсом.

В мировой практике исторически сложилось деление металлов на черные (железо и сплавы на его основе) и все остальные — цветные, или нечерные (англ. — *non-ferrous metals*, нем. — *Nichteisenmetalle*).

Зарождение металлургической промышленности в России

Так же, как и во всей Европе, в Московском государстве металл получали в примитивных сыродутных горнах и домницах с искусственным дутьем. Сосредоточены эти производства были главным образом вблизи месторождений местных болотных железных руд, в частности на севере — близ Финского залива, в Карелии, на р. Молога (Железный Устюг, Устюжна Железнопольская), а также близ г. Тулы.

Производство железа на территории России было известно с незапамятных времен. В результате археологических раскопок в районах, прилегающих к Новгороду, Владимиру,

Ярославлю, Пскову, Смоленску, Рязани, Мурому, Туле, Киеву, Вышгороду, Переяславлю, Вжищу, а также в районе Ладожского озера и в других местах обнаружены остатки плавильных горшков, сыродутных горнов, так называемых волчьих ям и соответствующие орудия производства. В одной из волчьих ям, применявшейся для выплавки железа, близ села Подмоклого, в южной части Подмосковского угольного бассейна, была найдена монета, датированная 189 г. мусульманской эры, что соответствует началу IX в. нашего летоисчисления. Это значит, что железо на Руси умели делать уже в те времена.

Металлографические и рентгено-структурные исследования многих древних образцов железных и стальных изделий свидетельствуют о высоком техническом уровне железоделательного производства того времени. Оказывается, древние русские металлурги применяли сложные технологические операции по многослойной сварке железа и стали и по термической обработке изделий. Так, сталь наваривали на рабочую часть железных топоров и секир; стальную полосу сваривали с двумя железными, в результате чего получали меч или нож, состоящий из трех слоев, из которых стальной слой в середине представлял режущее острие, а два железных слоя по бокам обеспечивали необходимые прочность и вес оружия; тонкие стальные прутки вваривали в железную основу при изготовлении наконечников боевых стрел, копий и т. п. Другими словами, используя современную техническую терминологию, изделия подвергались цементации, закалке и отпуску в разных средах. Результаты исследований указывают на самобытность и самостоятельность развития металлургической техники в Древней Руси.

Создание русского государства ознаменовалось бурным развитием производительных сил славянских племен. К этому времени относится переход от примитивных сыродутных горнов с естественной тягой к стационарной шахтной печи — домнице с искусственным дутьем, что резко повысило производительность установок.

Увеличение производства железа способствовало массовому распространению железных изделий. Наряду с действующими во многих местах государства крестьянскими дойницами образовались своего рода центры кустарного производства железа — Устюжна Железнопольская в Новгородской губернии, Дедилово в Тульской губернии и др.

Из писцовых книг Вотской пятины 1500–1505 гг. известно, что только в двух уездах близ Финского залива насчитывалось более 200 крестьянских домниц с одним-двумя горнами, в которых сыродутное железо выплавляли не только для местного употребления, но и на продажу. Кустарные крестьянские домницы существовали в России долгое время: еще в конце XVIII в. работало не менее 300 таких домниц. В то же время для производства ряда изделий (прежде всего оружия) металл импортировался из зарубежья, в основном из Англии и Швеции («свийское», или «свейское» оружие).

Сложная ситуация, в которой оказалась Московская Русь после поражения Ивана IV в Ливонской войне (потеря Смоленска и Прибалтийских земель), события «смутного времени» конца XVI — начала XVII в. вынуждали срочно искать способы, обеспечивающие армию современным оружием вне зависимости от закупок за рубежом. Эти обстоятельства явились причиной, по которой царь Борис Годунов, а затем и первые цари из династии Романовых (Михаил и Алексей) приглашают специалистов из стран Западной Европы.

В XVI–XVII вв. технология производства черных металлов в Западной Европе находилась на более высоком уровне, чем в Московском государстве (широкое применение водяных приводов, организация интенсивной подачи дутья и т. п.), а следовательно, эти страны имели достаточно специалистов, мастеров высокого уровня. По сложившейся традиции хороших мастеров приглашали на службу правители разных стран. Так, к концу XVII в. число приглашенных иностранных специалистов в России составляло несколько сот человек. Они трудились в разных сферах. В металлургии, например, особо заметный след оставил А. А. Виниус — выходец из Голландии. Получив от царя Михаила Романова в 1632 г. грамоту («для обработки железной руды в печах на чугун и железо, лить пушки, ядра и прочее, делать из железа ружейные стволы, прутья и т. д.») и денежную ссуду, он построил четыре

железодельных завода на р. Тулице, в 12 верстах от Тулы. Затем были построены Ведменский, Каширский, Угодский заводы в Тульском районе, а в 1670 г. — Истьянский завод в Рязанской губернии и несколько заводов в Олонецком крае. По описи 1690 г., в Тульско-Каширском районе было зарегистрировано семь заводов, из них два с доменными печами; производительность каждой из них была в два раза больше производительности лучших для того времени английских домен.

Общая производительность всех русских железодельных заводов в 1674 г. достигала 150 000 пудов (2400 т).

Около иностранных специалистов набирались опыта отечественные мастера. В грамоте, данной А. А. Виниусу, было, в частности, сказано: «Людей государевых всякому железнному делу научать и никакого ремесла от них не скрывать». Работа Виниуса была высоко оценена, и впоследствии он получил русское дворянство. Чугун и железо заводов Виниуса были значительно дешевле шведских; главное — исчезла шведская монополия на такие изделия.

Особую роль в развитии отечественного железодельного производства сыграл Петр I, который по праву считается одним из основоположников русской металлургии. По его указам были построены первые на Урале Невьянский и Каменский казенные заводы (1701 г.) (если не считать Ницинского завода, построенного на р. Нице в 1631 г., судьба которого осталась неизвестной). В 1703 г. был пущен Алапаевский завод. Строительством этих заводов было положено начало освоению нового Уральского железорудного района.

Впоследствии усилиями Петра I железодельное производство было организовано и развито на обширной территории всего Урала. Петр нашел талантливое предпринимателя и организатора производства Никиту Демидова, привлек его к проекту создания Уральского железорудного района.

Демидов при царской поддержке привел в образцовый порядок переданный ему в 1702 г. Невьянский завод и в сравнительно короткий срок построил Шуралинский (1716 г.), Верхнетагильский и Быньговский (1718 г.), Выйский (1721 г.), Нижнетагильский (1725 г.), Шайтанский (1732 г.) заводы. В 1734 г. на Урале насчитывалось уже 30 действующих заводов.

В течение всего XVIII в. производство металла на Урале непрерывно росло. Богатые железные руды, обилие лесов, дешевый труд крепостных — все это позволило России именно благодаря металлургии Урала выйти на первое место в мире по производству черных металлов, заметная часть которых экспортировалась. Максимальный экспорт черных металлов из России относится к 1798 г. (47 тыс. т). В тот период Россия была крупнейшим экспортером черных металлов в мире.

С металлургией Урала того времени связаны также имена В. Н. Татищева и В. И. Геннина. Приглашенный Петром I специалист в области горного дела голландец Георг Вильгельм де Геннин (в русской истории известен как В. И. Геннин) сыграл важную роль в начале в организации работы Олонецких литейных заводов (Карелия), снабжавших русскую армию во время войны со шведами. Затем он служил в качестве главного директора сибирских заводов. Историк, философ, видный государственный деятель XVIII в. В. Н. Татищев в течение многих лет успешно управлял казенными (государственными) заводами Урала. Считается, что Татищев в 1721–1723 гг. основал, а Геннин построил город Екатеринбург. По инициативе Татищева в этом городе было открыто первое на Урале Горное училище.

Геннин расширил Петровский, Алексеевский, Повенецкий и Вичковский казенные заводы, построенные по указам Петра I в 1701–1703 гг. вместо первых заводов олонецкой группы — Устьрецкого и Петрозерского, закрытых в начале войны со шведами. В 1721 г. Геннин руководил постройкой Сестрорецкого завода, а в 1722 г. ему было поручено управление уральскими казенными заводами. В дальнейшем им были построены уральские заводы: Верх-Исетский (1723 г.), Синячихинский (1727 г.) и Сысертский (1732 г.).

Еще более плодотворной оказалась деятельность преемника Геннина — В. Н. Татищева, который за короткий срок, в течение трех лет, значительно приумножил число уральских заводов. В 1734 г. к приезду Татищева на Урале действовало 30 заводов, в том числе 11 казенных и 14 демидовских. В 1737 г. на Урале уже работало более 40 заводов и 36 заводов строились или были запроектированы. За это время была построена Гороблагодатская группа заводов — Туринский, Кушвинский, Баранчинский. Позднее были пущены Серебрянский завод на западном склоне Урала, Боткинский и Ижевский заводы в Приуралье.

Быстрому развитию металлургии в этот период способствовало и привлечение частного капитала. За 9 лет, с 1754 по 1763 г., только на Урале возникло 42 частных металлургических завода, в том числе Златоустовский и Симский (1757 г.), Тирлянский (1759 г.), Белорецкий (1762 г.).

Точных данных о годовой выплавке черных металлов за это время нет. Достоверные сведения относятся к 1767 г., когда было выплавлено около 83000 т чугуна. Имеются ориентировочные данные, из которых можно заключить, что в 1793 г. было выплавлено 134 000 т чугуна и 89 760 т железа и стали.

До второй половины XIX в. в России основная доля производимых железа и стали поступала именно с уральских заводов. На Урале проводил свои исследования и знаменитый наш металлург П. П. Аносов. Около 40 лет работал на Урале крупный специалист в области производства рельсов и один из авторов так называемого «русского бессемерования» К. П. Поленов. На Урале длительное время работал и создавал свою теорию конструирования металлургических печей В. Е. Грум-Гржимайло — один из авторов первого русского учебника по производству стали.

Заметное изменение социально-экономической ситуации в России произошло благодаря реформам Александра II (с его именем связаны освобождение крестьян от крепостного права, реформа системы образования и др.). В России появилось больше свободных и грамотных людей.

С отменой крепостной зависимости в 1861 г. началось и техническое перевооружение металлургической промышленности. Водяные колеса стали заменяться паровыми машинами и электромоторами. В доменном производстве появились горячее дутье и минеральное горючее, в сталеплавильном производстве началось освоение новых высокопроизводительных способов получения литой стали — бессемеровского и мартеновского. Средний прирост выплавки стали за 30 лет, с 1870 по 1900 г., составлял 31% в год.

Вторая половина XIX в. ознаменовалась бурным развитием южной металлургии. Попытки освоения южного железорудного района начались с постройки Луганского (1795 г.), Керченского (1845 г.), Бахмутского (1858 г.) и Лисичанского казенных заводов, но действительными основателями южной металлургии являются русский капиталист Пастухов, построивший Сулинский завод (1870 г.), и акционерная компания «Новороссийское общество», построившая Юзовский завод (1871 г.).

После открытия Криворожского бассейна появились заводы: Александровский, ныне завод им. Петровского (1887 г.), Днепровский (1889 г.), Дружковский, Таганрогский, Донецко-Юрьевский, Петровский (1895 г.), Никополь-Мариупольский (1896 г.), Макеевский (1897 г.), Керченский (1898 г.) и др.

Несколько позже были пущены заводы в центральном районе России.

Бурный рост промышленности неизбежно привел к увеличению числа технических специалистов в области горного дела и металлургии. В начале это были выпускники университетов и учебных заведений Петербурга и приезжие специалисты из-за рубежа; впоследствии появились специальные учебные заведения в Екатеринославе, Томске, Киеве, Варшаве. Российские специалисты постепенно начали «вытеснять» иностранцев, успешно решая многие технические задачи самостоятельно.

В 1894 г. на Александровском заводе в Екатеринославе братьями Ю. М. и Л. М. Горяиновыми была разработана технология рационального использования жидкого передельного

чугуна при производстве стали в основном мартеновском процессе путем заливки жидкого чугуна на предварительно нагретые руду и известняк. Процесс получил название *рудного процесса* (или *процесса братьев Горяиновых*).

В 1876 г. на Нижнесалдинском заводе на Урале была разработана технология, получившая название *«русское бессемерование»*.

Наш виднейший металлург В. Е. Грум-Гржимайло в своих воспоминаниях пишет, что на этом заводе использовали весьма распространенную в то время технологию, при которой чугун расплавляли в пламенной регенеративной печи и затем заливали в бессемеровский конвертер. Для нормального проведения операции продувки в конвертере принято было заливать чугун, содержащий не менее 2% Si. На одной из плавки обстоятельства сложились так, что плавка в печи затянулась, вследствие чего значительная часть кремния окислилась, и в конвертер попал чугун с низким содержанием кремния. Несмотря на это, продувка в конвертере прошла нормально и полученная сталь была высокого качества. Заводом в то время управлял известный металлург К. П. Поленов. Он обратил внимание на необычно хороший результат этой «ненормальной» плавки, на то, что «холодный» химически (с малым содержанием кремния) чугун был перегрет, т. е. был «физически горячим».

В результате после проведения еще нескольких аналогичных опытных плавки им была разработана технология *«русского бессемерования»* с использованием малокремнистого чугуна, имеющего высокую температуру. Эта технология оказалась экономически выгодной и использовалась на ряде заводов (в том числе на Обуховском в Санкт-Петербурге). Важно подчеркнуть творческое отношение к делу К. П. Поленова, его инженерное чутье. Казалось бы, единичный факт «нарушения» технологии, но с хорошим результатом — и Поленов исследует его (в то время это было одно из немногих исследований металлургического процесса) и доводит дело до широкого внедрения.

Южная металлургия с ее крупными металлургическими заводами обеспечивала развитие народного хозяйства России вплоть до начала Первой мировой войны, когда производство стали в России достигло 4,25 млн т (пятое место в мире после США, Германии, Англии и Франции).

Условно металлургические предприятия того времени можно разделить на три группы: а) сравнительно современные по технике и технологии заводы Юга; б) старые уральские заводы: Алапаевский, Нижнетагильский, Верх-Исетский, Златоустовский, Белорецкий, Лысьвенский, Выксунский, Чусовской, Надеждинский (ныне г. Серов) и др., и в) заводы в крупных промышленных центрах, использующие металлоотходы местных промышленных предприятий (в Петербурге, Москве, Н. Новгороде, Царицыне и др.).

В 1913 г., перед Первой мировой войной, по количеству выплавляемой стали Россия находилась на пятом месте в мире. В это время в России выплавлялось 4,3 млн т стали в год. После разрухи, вызванной Гражданской войной, на территории СССР выплавлялось в год менее 200 тыс. т стали. В период восстановления народного хозяйства и за годы первых пятилеток в результате героического труда советского народа производство стали увеличилось более чем в 4 раза по сравнению с дореволюционным. Такое значительное увеличение производства стало возможным в результате коренной реконструкции старых заводов, а также строительства.

Во время Великой Отечественной войны 1941–1945 гг. на востоке страны было построено 10 доменных, 29 мартеновских и 16 электродуговых печей. Сталеплавильщики Урала освоили выплавку высоколегированной, в том числе броневой, стали в 185-тонных мартеновских печах; мартеновцы Кузнецка и Магнитки впервые в мировой практике сумели удвоить мощность действующих мартеновских печей. Начиная с весны 1942 г., производство стали в стране неуклонно возрастало, и в 1945 г. было выплавлено уже более 12 млн т. По мере освобождения оккупированных территорий развернулись

восстановительные работы. Только в 1943–1944 гг. было введено в строй 13 доменных и 70 сталеплавильных печей.

В годы войны на востоке страны вступили в строй новые заводы, в том числе Челябинский металлургический комбинат (первая плавка электростали в апреле 1943 г.), Кузнецкий ферросплавный и другие заводы.

В первые же послевоенные годы огромная работа была проведена по восстановлению разрушенных врагом металлургических заводов, расположенных в центральных районах РСФСР и на Украине. В результате уже в 1948 г. производство в стране превзошло довоенный уровень (выплавлено 18,6 млн т). В 1955 г. в СССР было выплавлено уже более 45 млн т стали. Такой значительный рост производства стали после войны был достигнут прежде всего не за счет строительства новых заводов, а за счет увеличения производственных мощностей на действующих предприятиях, увеличения емкости печей и в первую очередь совершенствования технологии и организации работ. Так, например, производство стали на Кузнецком металлургическом комбинате увеличилось почти на треть, причем не было введено в строй ни одной новой печи. Съем стали с 1 м² пода мартеновских печей в среднем по СССР увеличился с 3,75 т в 1945 г. до 6,96 т в 1957 г. В 1966 г. черная металлургия СССР достигла знаменательного рубежа: выплавка стали превысила 100 млн т. Таким образом, за 10 лет, с 1957 по 1967 г., металлурги СССР сумели удвоить производство стали. В 1971 г. СССР по выплавке стали вышел на первое место в мире. В 1986 г. производство стали в СССР превысило 160 млн т. В 1990 г. производство стали в СССР составило 154,4 млн т, в том числе предприятиями, расположенными на территории РСФСР, было произведено 89,6 млн т стали.

До 1991 г. металлургическое производство Российской Федерации являлось составной частью единого производственного комплекса Союза ССР. После выделения из состава СССР отдельных союзных республик сырьевое обеспечение металлургического производства России нарушилось. Так, например, богатые марганцевые руды и заводы, производящие марганецсодержащие сплавы, остались на Украине и в Грузии. Производство титана осталось на Украине, месторождения хромистых руд — в Казахстане и т. д. За прошедшие годы многие связанные с этим проблемы решены.

Кроме того, серьезные проблемы, которые пришлось также оперативно решать, — это проблемы, связанные с обновлением устаревшего оборудования и прекращением деятельности неэффективных производств. В период 1990–1997 гг. на металлургических заводах России выведено из эксплуатации и демонтировано 66 мартеновских печей, 1 конвертер, 3 дуговые сталеплавильные печи (общей производственной мощностью около 27 млн т стали в год).

За 2016 г. использование мощностей по производству готового проката составило 80,4%, по производству стали — 82,2%, по производству чугуна — 83%. Данная загрузка производственных мощностей сопоставима с показателями основных зарубежных металлургических компаний-производителей черных металлов.

ЦИКЛЫ РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЧУГУНА И СТАЛИ

Исторически развитие металлургии тесно связано с механическим прогрессом в целом. История массового производства стали начинается в XIX в. Именно во второй половине XIX в. были созданы процессы и агрегаты для производства стали, которые легли в основу сталеплавильного производства и используются по сей день.

По этой причине технологические циклы развития производства стали и чугуна можно соотнести с основными циклами развития мировой промышленности.

Таблица 7.3. Основные этапы технологических циклов развития производства чугуна и стали

Цикл	Научно-технический этап	Технико-экономический этап	Экономическо-социальный этап	Социально-регуляторный этап
Первый (прямое получение железа из руды)	Прямое получение железа — сыродутный процесс	Развитие технологии сыродутного производства	Рост потребления железа в различных отраслях	Высокая трудоемкость и малая производительность
Второй (получение кричного железа из чугуна)	Вытеснение сыродутного процесса из производства	Получение кричного железа из чугуна	Активное развитие промышленности	Низкая производительность, дороговизна кричного передела, массовое уничтожение лесов
Третий (получение стали в пудлинговой печи)	Поиск более производительного способа получения железа	Получение стали окислительным плавлением чугуна на подду отражательно печи	Усовершенствование пудлинговых печей	Низкая производительность, невозможность получения литой стали
Четвертый (получение жидкой (литой) стали)	Вытеснение технологии получения стали в пудлинговых печах	Получение литой стали конверторным, мартеновским электроплавильным способом	Ужесточение природоохранного законодательства, отказ от неэкологичных технологий	Методы непрерывного сталеварения и появление сталеплавильных агрегатов непрерывного действия

Первый технологический цикл — прямое получение железа из руды

Получение железа непосредственно из руды — наиболее древний способ производства железа. В глубокой древности железо получали путем его восстановления из руды в примитивных горнах. Поскольку в этом процессе использовалось «сырое» дутье (неподогретый воздух), способ получил название «сыродутный».

Сущность сыродутного способа получения железа заключается в следующем: в горн загружают древесный уголь и железную руду, уголь разжигают и начинают подавать дутье; по мере сгорания и «оседания» угля руда опускается, подвергаясь непрерывному контакту с восстановительными газами и раскаленным углем и постепенно при этом восстанавливаясь.

Расчетная температура горения угля в холодном воздухе с нормальной влажностью около 1400°С. Учитывая неизбежные потери тепла, предположительно температура процесса составляет 1300–1350°С, а при таких температурах шлак образуется в жидком виде. Шлак в основном должен состоять из оксидов железа (значительная часть железа руды переходила в шлак и терялась с ним). В результате процесса получали раскисленный ком («крицу») восстановленного железа (с прожилками шлака), который вытаскивали из горна и обрабатывали под молотами, уплотняя крицу и выдавливая из нее шлак. Состав металла в этом процессе зависит от состава пустой породы руды, от температуры процесса и продолжительности пребывания крицы в горне.

Существовало много разновидностей сыродутного процесса, причем в некоторых установках получали за одну операцию, длившуюся 6–7 ч, до 200 кг железа. Такие недостатки сыродутного производства, как малая производительность, большой расход топлива, большие потери железа со шлаком, высокая трудоемкость процесса и низкое качество металла, определили повсеместное его вытеснение. К концу XX в. возникли новые способы получения железа непосредственно из железорудных материалов. Эти способы получили общее

название «прямое получение железа» (*англ.* DI или DRI: Direct-Reduced-Iron). Получаемый при этом продукт часто называют «первородной шихтой» (т. е. не подвергавшейся переплаву). Этот продукт обычно используют в качестве шихты в дальнейшем переделе.

Второй технологический цикл — получение кричного железа из чугуна

По мере усовершенствования сыродутного процесса горны строили все большей вместимости, более высокими, подачу дутья интенсифицировали; это привело к повышению температуры в горне и к более продолжительному пребыванию шихтовых материалов в зоне высоких температур. В результате в ряде случаев происходило заметное науглероживание железа, и продуктом процесса оказывалось не низкоуглеродистое железо, а высокоуглеродистое, т. е. чугун. Чугун не обладает пластическими свойствами (не куется, не сгибается и т. п.); часто его считали нежелательным продуктом и выбрасывали. Однако было замечено, что при загрузке в горн чугуна вместо железной руды или в случае продолжения операции из оставленной в горне высокоуглеродистой крицы также получается низкоуглеродистая железная крица. Такой двухстадийный процесс (вначале выплавка чугуна, а потом получение из чугуна низкоуглеродистого металла) как более производительный привел к возникновению более совершенного способа производства железа, получившего название *кричный процесс*. Дата появления кричного процесса, так же как и сыродутного, неизвестна, но уже в XII–XIII вв. кричный способ был распространен.

Куски (болванки) чугуна называют чушками («чушка» по-русски — это молодая свинья); чушка чугуна по-английски *pig iron* — свинское железо (*pig* — свинья).

Таким образом, сущность кричного способа переработки чугуна в железо и сталь заключается в расплавлении чугуна в горне на древесном угле и окислении углерода, кремния, марганца и других примесей чугуна кислородом дутья и действием шлаков, богатых оксидами железа.

Выложенный огнеупорными материалами или водоохлаждаемыми чугунными плитами горн наполняют древесным углем, разжигают его и подают дутье. После того как уголь хорошо разгорится, присаживают чугун и богатые оксидами железа шлаки, окалину, железную руду. Чугун помещают обычно на уровне фурмы или несколько выше ее, где он постепенно плавится и в виде капель стекает вниз. Одновременно под действием кислорода воздуха дутья и оксидов железа шлака происходит выгорание примесей чугуна.

По мере выгорания примесей чугуна (в частности, углерода) повышается температура его плавления. Напомним, что температура плавления чугуна 1150–1200°С, низкоуглеродистого железа несколько выше — 1500°С. Температура в горне достигает 1300–1400°С, т. е. достаточна для расплавления чугуна, но недостаточна для поддержания в жидком виде образующегося низкоуглеродистого сплава. В результате по мере выгорания примесей металл становится все более тугоплавким и все более вязким. Наступает момент, когда на дне горна образуется зернистая тестообразная железистая масса, которую собирают в один общий ком (крицу), достают из горна и обжимают под молотом, чтобы удалить из металла шлак и получить возможно более плотный и однородный кусок железа. В связи с тем, что горючие материалы, применяющиеся в кричном производстве, находятся в непосредственном контакте с металлом, они должны быть чистыми от золы и вредных примесей (главным образом от серы). Таким требованиям лучше всего удовлетворяет древесный уголь.

Сера во время процесса выгорает в незначительной степени; фосфор удаётся удалить на 50–60%, чему способствуют умеренная температура процесса и высокое (иногда > 90%) содержание оксидов железа в шлаке. Готовая крица обычно содержит, %: 0,03–0,05 С, 0,01–0,02 Si, до 0,08 Mn, 0,01–0,04 P, 0,004–0,006 S.

Сравнительно высокопроизводительные (по тем временам) относительно высокие печи-горны, начиная с XIII в., были распространены по всей Европе. На территории России известна местность (в старину называвшаяся Железным полем), где расположен город

Устюжна (Вологодская обл.). В XIII в. местность называлась Железный Устюг. К началу XVII в. там производили ежегодно около 1 тыс. т железных изделий.

Высокопроизводительные печи-горны в России назывались *домницами*, в Англии — *high blomery furnace* (большая кричная печь), в Германии — *Stückofen* (от *Stück* — кусок, крица и *Ofen* — печь), или *Wolfofen* (волчья печь), во Франции — *fourneau à loupe* (волчья печь).

Также как и сыродутный, кричный способ производства имел ряд существенных недостатков: низкая производительность, высокий угар железа (до 20%), большой расход топлива (древесного угля), большая трудоемкость процесса и др. В результате в конце XIX — начале XX в. кричный процесс исчез.

Третий технологический цикл — получение стали в пудлинговой печи

Низкая производительность и дороговизна кричного передела, а также массовое уничтожение лесов вокруг промышленных центров, вызванное необходимостью получения больших количеств древесного угля, — причины, способствующие поиску более производительного способа железа, причем такого, при котором можно было заменить чистый древесный уголь другим, более дешевым и менее дефицитным топливом. В 1784 г. англичанин Г. Корт предложил получать сталь окислительным плавлением чугуна на поду отражательной печи — способ, позволяющий сжигать в топке печи любое горючее (топка была отделена от ванны металла). Печь получила название *пудлинговой*. От англ. *to puddle* — месить, перемешивать. Чистота горючего уже не играет такой роли, как при кричном переделе, так как непосредственный контакт горючего с металлом отсутствует.

Печи для производства чугуна в России получили название «домна» (от *старославянск.* «дмение» — дутье); в Англии *blast furnace* (дутьевая печь); в Германии *Hoch ofen* (высокая печь); во Франции *haul fourneau* (большая высокая печь); у западных славян: *wielki pec* (*польск.*, большая печь), *vysoká pec* (*чешск.*, высокая печь).

Садка типичной пудлинговой печи 250–500 кг (иногда выше — до 1 т). Слой расплавленного чугуна 25–35 мм. Длина рабочего пространства 1,5–1,8 м, ширина — не более 1,5 м (при большей ширине трудно перемешивать металл в печи). Высота от чугунной доски, на которую набивался материал пода, до свода 0,6–0,8 м. Высота трубы 12–16 м. Иногда устанавливали трубы высотой до 50 м, которые обслуживали несколько печей.

С 1830 г. по предложению англичанина Галла подины пудлинговых печей стали делать из материалов, богатых оксидами железа: богатой железной руды, окалины (подины первых печей делали из песка). Операция пудлингования сводится к следующему: после необходимого по окончании предыдущей операции исправления пода на него загружают предварительно подогретый чугун. Расплавление чугуна сопровождается окислением его примесей. За периодом расплавления следует так называемое «вымешивание»: температуру на короткий промежуток времени несколько снижают (чтобы добиться более полного контакта металла со шлаком), и рабочие пудлингеры перемешивают металл и шлак клюкой (или ломом). Источниками образующегося шлака являются: подина, специально добавляемая окалина, железная руда, а также железо и примеси чугуна, окисляемые в атмосфере печи.

По мере выгорания примесей и снижения содержания углерода температура плавления $t_{пл}$ сплава данного состава возрастает. Наступает момент, когда $t_{пл}$ оказывается равной температуре в печи t_n . Дальнейшее возрастание $t_{пл}$ приводит к тому, что из расплава начинают выпадать кристаллы наиболее чистого железа с высокой температурой плавления. Этот процесс называется избирательным вымораживанием.

Когда завершается обезуглероживание металла, приступают к «накатке» криц (комьями по 30–50 кг, чтобы их можно было перемещать вручную). Крицы вынимают из печи и отправляют под молот.

Так же, как и в кричном переделе, в пудлинговом процессе из металла в шлак удаляются значительная часть фосфора (до 50–80%) и некоторое количество серы. Для получения

готового продукта однородного состава применяется многократная прокатка криц в пакетах. Например, на уральских заводах России состав низкоуглеродистого железа, получаемого в пудлинговых печах, был следующим, %: 0,1–0,2 С, 0,05–0,1 Si, ~ 0,1 Mn, 0,01 P и 0,004 S, т. е. получали очень чистый металл.

На долю шлаковых включений в зависимости от методов работы приходится от 0,2 до 1%.

Усовершенствованные регенеративные пудлинговые печи со сдвоенным рабочим пространством позволяли получать в сутки около 15 т металла; при этом расходовалось около 9 т угля. В начале XX в. стоимость пудлингового железа ненамного превышала стоимость мартеновской стали. Так, в 1908 г. в России пуд кричного железа стоил 94 коп., пудлингового — 80 коп., мартеновского — 75 коп.

К недостаткам пудлингового процесса относятся: высокий расход топлива, низкая производительность, невозможность получения литой стали. Несмотря на большие инженерные усилия с целью повышения производительности и уменьшения трудоемкости пудлингового процесса (применение регенеративных печей, печей с вращающимся вокруг вертикальной или горизонтальной оси рабочим пространством, работа на жидком чугуна и т. п.), этот процесс не выдержал конкуренции с появившимся конвертерным, а затем мартеновским производством.

Одним из существенных недостатков и кричного, и пудлингового процессов является невозможность получения плотной литой отливки из стали, так как и в кричных горнах, и в пудлинговых печах температура оказывалась недостаточной для расплавления металла. Получаемые крицы представляли собой комья сварившихся между собой зерен металла. Окончательная сварка зерен проходила при последующих нагревах и обработке металла давлением. Поэтому продукты кричного и пудлингового процессов в технической литературе часто объединяют одним термином — «сварочное железо».

В нашей стране пудлингование исчезло в 30-х гг. XX в. Из-за особых качеств пудлингового металла этот процесс еще долго сохранялся в таких промышленно развитых странах, как Англия, Швеция, США.

Особые свойства сварочного железа обусловлены способом его получения. Этот продукт получается в процессе окисления примесей чугуна и выпадения образовавшихся частиц тугоплавкого чистого металла из раствора («вымораживания»). Растворимость газов в твердом металле значительно ниже, чем в жидком, поэтому выпадающие из раствора зерна металла практически не содержат газов. Кроме того, шлаковые включения, которые в значительном количестве остаются в кричном металле, представляют собой крупные включения, расположенные между кристаллами чистого металла, в отличие от микроскопических включений, встречающихся в больших количествах в литой стали, выплавляемой современными способами. (Такие включения часто имеют остроугольную форму и являются концентраторами напряжений.) Коагулированные шлаковые включения, пронизывающие металл, несколько снижают его механические характеристики (например, сопротивление разрыву), но, препятствуя распространению процесса коррозии, развитию внутренних трещин в металле, способствуют повышению сопротивления металла ударной нагрузке и усталости и тем самым содействуют гашению вибраций, развивающихся в металле различных конструкций, подвергающихся ударным воздействиям, и т. п. Определенное значение имеет и многократная обработка давлением полученного из кричного металла продукта (обычно листового проката). Кричный металл хорошо сваривается; в нем мало и таких вредных примесей, как сера (благодаря чистоте шихтовых материалов) и фосфор (в результате энергичного окисления фосфора по ходу процесса). Благодаря этим особым свойствам сварочное железо продолжало пользоваться определенным спросом. Из него изготавливали полосы для сварных труб, листы для строительства подводных частей мостов и портовых сооружений, стяжные болты, цилиндры паровых машин, изделия для свайных и кессонных работ, цепи ответственного назначения, цельнотянутые трубы и т. п. По некоторым данным,

знаменитые дамасские стали производили из первородной шихты способами производства сварочного железа.

Четвертый технологический цикл — получение жидкой (литой) стали

Все перечисленные выше способы производства стали малопроизводительны. Бурное развитие промышленности и железнодорожного транспорта в середине XIX в. сдерживалось отсутствием высокопроизводительных и дешевых способов производства стали. Ответом на эти требования жизни явились разработка и широкое распространение двух новых способов производства: конвертерного и мартеновского.

Простой и дешевый способ получения литой стали в больших количествах путем продувки жидкого чугуна воздухом был предложен в 1855 г. английским механиком Генри Бессемером. Продувку чугуна вели в специальном агрегате — конвертере с кислой футеровкой. Способ получил название *конвертерного (бессемеровского)*.

Г. Бессемеру удалось предложить простую и удобную форму агрегата. За прошедшие полтора столетия сам процесс плавки существенно изменился, но конструкция агрегата осталась в принципе без изменения.

В 1878–1879 гг. англичанином Томасом был разработан вариант конвертерного процесса, при котором футеровку конвертера выполняли из доломита — материала, обладающего основными свойствами. Этот процесс получил название *томасовского* или «основного конвертерного», или «основного бессемеровского». В томасовском конвертере можно было наводить основной шлак.

В бессемеровском и томасовском процессах продувку жидкого чугуна в конвертере осуществляли воздухом. Выделяемого при этом тепла экзотермических реакций хватало только на нагрев залитого в конвертер металла (температура заливаемого в конвертер чугуна 1200–1300° С; температура получаемой стали должна быть около 1600° С). Возможностей переплава в конвертерах с воздушным дутьем шихты, в состав которой входил бы металлический лом, не было.

В 1865 г. во Франции Эмиль и Пьер Мартены успешно осуществили выплавку стали из чугуна и железного лома в *регенеративных пламенных печах*. Получение в пламенных печах высокой температуры, достаточной для расплавления твердой шихты и получения стали, стало возможным благодаря подаче в печь подогретых газа и воздуха. Принцип использования тепла отходящих газов для подогрева топлива и воздуха в регенераторах промышленных печей впервые был реализован в 1856 г. братьями Сименсами, инженерами немецкого происхождения. Поэтому в ряде стран (прежде всего в Германии, а до революции 1917 г. и в России) процесс называли «сименс-мартеновским». Во Франции и в СССР он получил распространение под названием *мартеновского*. В англоязычной специальной литературе процесс называют *open hearth process* (процесс на открытом поду) или сокращенно *ОН-process*.

Конвертерный и мартеновский способы явились базой, обеспечившей бурный рост индустриальной мощности промышленно развитых стран. Менее чем за 100 лет мировое производство стали выросло более чем в тысячу раз (с 330 тыс. т в 1868 г. до 346 млн т в 1960 г.).

Во второй половине XIX в. появились предложения по использованию для плавки стали электрической энергии. В конце XIX — начале XX в. были созданы и начали работать электропечи различных конструкций. Началом эпохи развития электрометаллургии принято считать разработку в 1899 г. французским инженером П. Эру (Геру) проекта небольшой дуговой печи для плавки стали. Первые такие печи были маломощными и могли работать только на расплавленной шихте. Изобретение нашим соотечественником М. О. Доливо-Добровольским трехфазного переменного тока сделало возможным строительство трехфазных печей (вначале в США и России, затем в Германии, Франции и других странах).

Недостаток и дороговизна электроэнергии сдерживали развитие электрометаллургии. В течение длительного времени электропечи использовались главным образом для производства высококачественных высоколегированных марок стали. В настоящее время ситуация изменилась коренным образом: появилась возможность использовать печи большой емкости; мощность трансформаторов увеличилась до 800–1000 кВА/т стали; соответственно изменились конструкции печей и технологии выплавки стали.

В настоящее время около 1/3 мировой выплавки стали приходится на сталь из дуговых электропечей, около 2/3 мировой выплавки стали — это конвертерная сталь.

Переход на непрерывную разливку стали

Переход на непрерывную разливку металлов начался примерно 50–60 лет назад с разработки технологий непрерывного литья сравнительно легкоплавких алюминиевых и магниевых сплавов. Достигнутые в этом деле успехи помогли отработать методы непрерывной разливки стали и конструировать соответствующее оборудование. В результате в конце XX в. основная масса выплавляемой в мире стали разливалась не в изложницы, а на установках непрерывной разливки.

Созданы установки, на которых получают стальные заготовки с профилем, близким к окончательному, установки, непосредственно сопряженные с прокатными станами.

Переход на непрерывную разливку не только позволил отказаться от строительства цехов блюминга, слябинга, дворов изложниц и т. д., но существенно изменил коэффициенты расхода металлошихты на 1 т годного — они стали ниже на 10–20%. Другими словами, при том же расходе материалов заметно увеличилась масса реально используемого металла.

Переход на непрерывную разливку сделал также ненужным производство изложниц, прибыльных надставок, центровых, поддонов и прочего оборудования, необходимого ранее при разливке стали в изложницы.

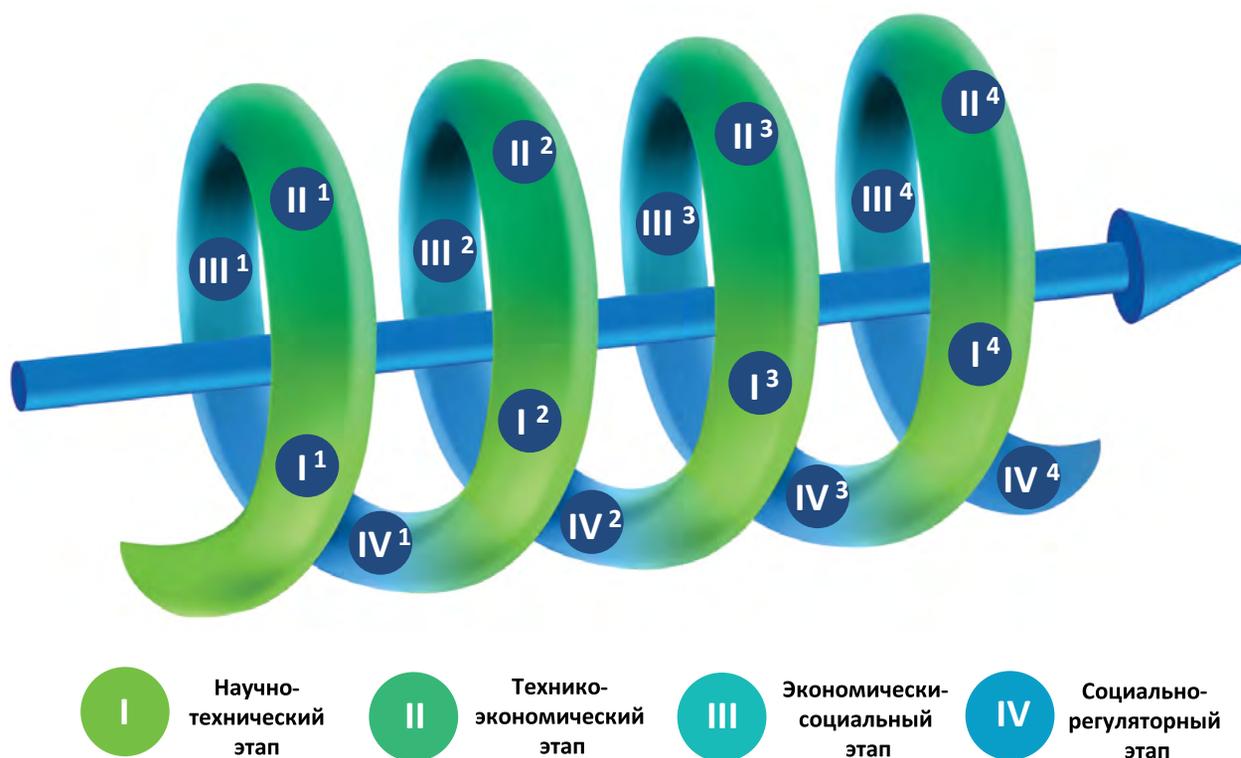
В то же время при переходе на непрерывную разливку потребовалось существенно повысить чистоту разливаемой стали, и возникла проблема совершенствования контроля за ее качеством. В результате вся сталь, поступающая на установки непрерывной разливки, подвергается дополнительной внепечной обработке.

Опыт многих производств показал, что замена периодического процесса непрерывным способствует повышению производительности, снижению эксплуатационных затрат, повышению качества и однородности (стандартности) продукции, ресурсосбережению, более эффективному использованию шихтовых и добавочных материалов. Применительно к созданию сталеплавильных агрегатов непрерывного действия оптимальных решений еще не найдено, однако проведены и проводятся эксперименты, успешно решаются многочисленные проблемы, связанные с повышением стойкости огнеупоров, многократным использованием шлака, организацией непрерывного контроля процесса плавки и методов непрерывной загрузки шихты и т. д.

Эволюция технологий производства чугуна и стали

Каждый цикл обусловлен определенным этапом, который дает новый толчок к развитию технологий. Последовательное прохождение всех этапов приводит к завершению цикла развития отрасли, после чего цикл повторяется.

Ресурсоэффективность рассматривается как важнейший фундаментальный концепт перехода технологического развития на новый уровень. При этом метод исследования сосредоточен на изучении реакции отрасли как целого на изменяющиеся условия, без подробного описания механизма работы и внутреннего устройства той или иной технологии, так как в рамках поставленной задачи это не является первостепенным объектом изучения.



I¹ — появление сыродутного процесса

II¹ — развитие технологий сыродутного производства

III¹ — рост потребления железа в различных отраслях

IV¹ — высокая трудоемкость и малая производительность технологии

I² — вытеснение сыродутного процесса из производства

II² — получение кричного железа из чугуна

III² — активное развитие промышленности

IV² — низкая производительность, дороговизна кричного передела, массовое уничтожение лесов

I³ — поиск более производительного способа получения железа

II³ — получение стали окислительным плавлением чугуна на поду отражательной печи

III³ — усовершенствование пудлинговых печей

IV³ — низкая производительность, невозможность получения литой стали

I⁴ — вытеснение технологии получения стали в пудлинговой печи

II⁴ — получение литой стали конверторным, электроплавильным и мартеновским способами

III⁴ — ужесточение природоохранного законодательства, отказ от неэкологических технологий

IV⁴ — методы непрерывного сталеварения и появление сталеплавильных агрегатов непрерывного действия

Рис. 7.3. Эволюция технологий производства чугуна и стали

ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА ЧУГУНА И СТАЛИ

Металлургическая промышленность (производство чугуна, стали и ферросплавов) включает следующие мощности:

- агломерационные производства (для окучкования мелкодисперсного железорудного сырья);
- производство металлургического кокса;
- цехи по выплавке чугуна;
- производства по выплавке стали (мартеновским, конвертерным или электросталеплавильным процессом);
- вспомогательные цехи и производства (по производству ферросплавов, переработке шлаков, производству электрической энергии, обработке сточных вод и др.).

Основные металлургические процессы, их взаимосвязи проиллюстрированы рис. 7.4 (слева — сырье, справа — продукты производства).

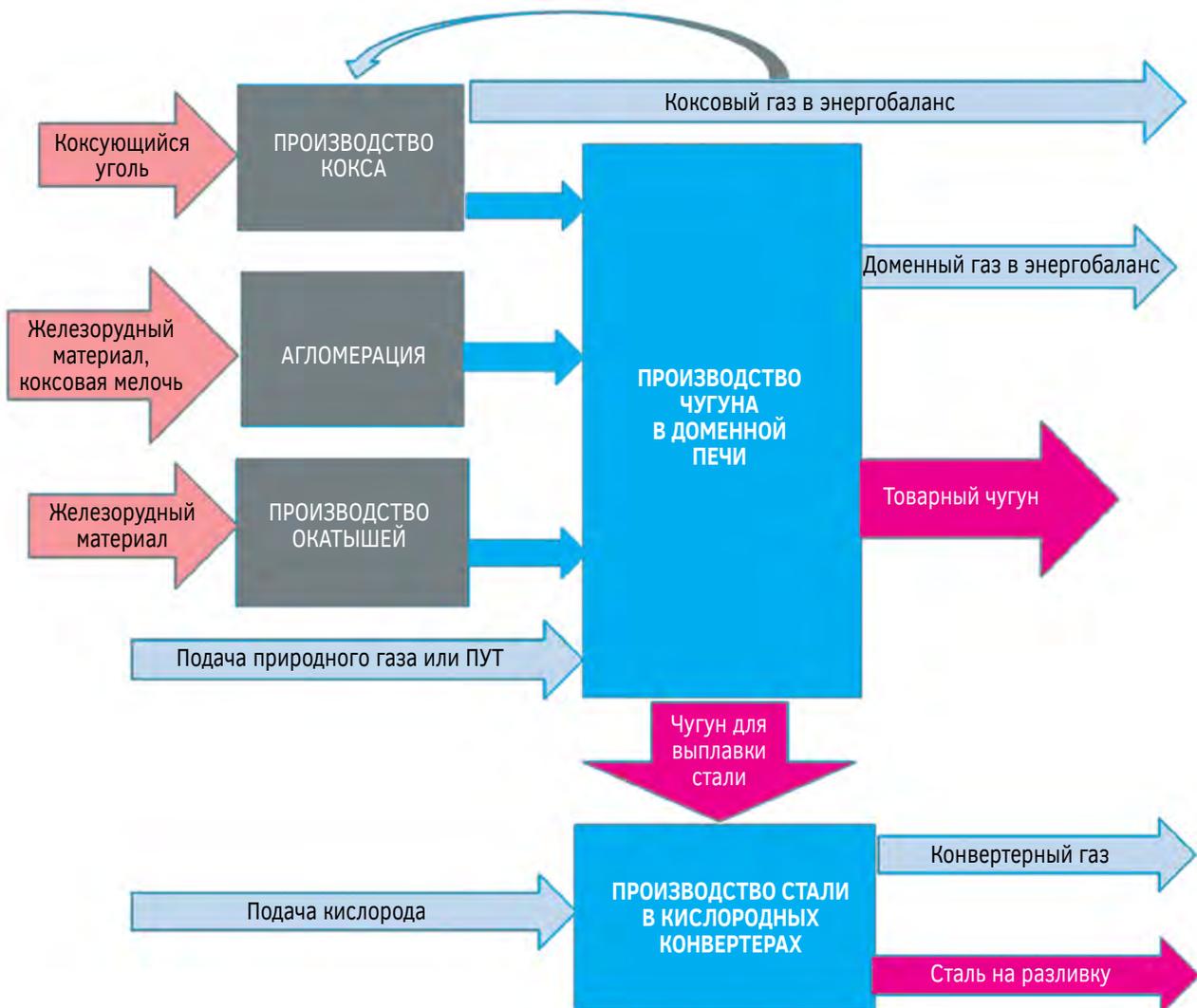


Рис. 7.4. Основные металлургические процессы, их взаимосвязи

Производство кокса

Вещество кокса представляет собой спекшуюся углеродную массу, содержание углерода 82–89%, зольность 10–12%. Кокс является основным восстановительным агентом, опорным материалом и фильтрующей матрицей в доменной печи, применяется в производстве ферросплавов, производстве электродов в цветной металлургии, химической промышленности.

Кокс получают в процессе пиролиза угля, который заключается в нагреве угля без доступа воздуха. При нагреве угля образуются газы, жидкие вещества и твердый остаток, представляющий собой кокс. Пиролиз угля при высоких температурах называют коксованием (карбонизацией). В отопительных простенках коксовой батареи между печными камерами сгорает газовое топливо. Температура дымовых газов составляет 1150–1350°С, что обеспечивает не прямой нагрев угля до температуры 1000–1100°С. В течение 14–24 ч в результате нагрева получают кокс, используемый в доменном, литейном и других производствах.

Образующийся при работе печей коксовый газ подвергают охлаждению и очистке от смолистых веществ и бензольных углеводородов. Эти процессы сопровождаются улавливанием и получением ценных химических продуктов.

Традиционный способ производства кокса в камерных печах, объединенных в коксовые батареи, остается единственным. Изменяются лишь масштабы печей и применяются некоторые усовершенствования оборудования, включая установки для защиты окружающей среды от загрязнения. Разрабатываются новые технологии, в первую очередь — непрерывного и непрерывно-периодического коксования в кольцевых, шахтных печах и печах с наклонным подом. Эти технологии прошли опытно-промышленную проверку, но до настоящего времени в промышленных масштабах не используются.

Принципиальная схема производства кокса приведена на рис. 7.5.

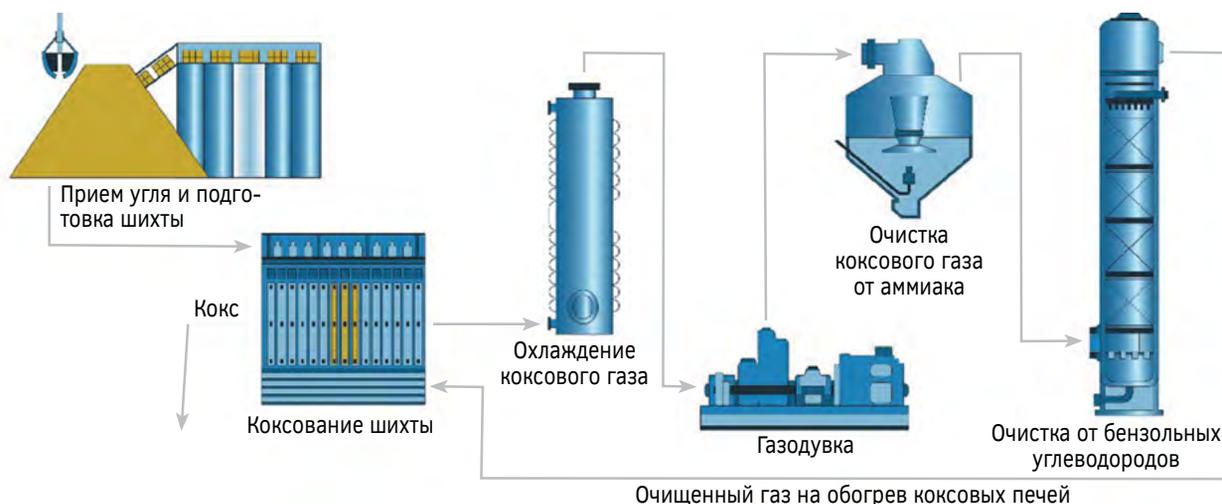


Рис. 7.5. Принципиальная схема производства кокса

Процесс производства кокса включает в себя следующие технологические операции:

- загрузка камер коксования угольной шихтой;
- нагрев угольной шихты без доступа воздуха до заданных температур за установленный период времени в коксовых печах;
- отвод и охлаждение прямого коксового газа из камер коксования;
- выдача готового кокса из печей;
- тушение кокса;
- сортировка кокса на фракции;
- транспортировка коксовой продукции в доменный цех или отгрузка кокса потребителям.

В процессе производства кокса в печах все технологические операции повторяются в течение всего времени работы цеха, причем выдача кокса и загрузка печей ведется по циклическому графику. Циклический график выдачи кокса из печей разделяет оборот печей в блоке из двух батарей на две части: рабочую и ремонтную. В течение рабочей части цикла производится выдача кокса из всех камер блока двух батарей; в ремонтной части цикла ведутся ремонты путей коксовых печей, троллей, тушильных башен и другого оборудования; проводится уборка путей тушильного вагона и коксовыталькователя.

Промежуток времени от загрузки печи до выдачи кокса называют периодом коксования. Период коксования с прибавкой времени на операции по загрузке шихты и выдаче кокса называют временем оборота печей или оборотом печей.

В состав коксовых цехов входят коксовые батареи со вспомогательными и обслуживающими устройствами и сооружениями, обычно объединенные в блоки из двух батарей; угольные башни; коксовые машины; тушильные башни для мокрого тушения кокса с насосами и отстойниками; коксовые рампы с транспортерами для подачи кокса на сортировку; коксораспределение с устройствами для рассева кокса, подачи его в доменный цех или в железнодорожные вагоны с бункерами для промежуточного накопления. Назначение коксовых цехов — производство из угольной шихты кокса и коксового газа установленного качества.

Агломерация

Агломерация — это один из методов окучивания, т. е. превращение мелких руд и концентратов в кусковый материал — агломерат, применение которого улучшает ход металлургических процессов при производстве различных металлов из руд. В шихте доменных печей доля агломерата составляет около 60%.

Агломерат производят методом спекания железорудной шихты на ленточных машинах непрерывного действия — агломашинах. На предприятиях черной металлургии России работает 45 агломерационных машин, которые производят около 40 млн т агломерата в год.

В зависимости от требований доменной плавки производят различные виды агломерата: нефлюсованный с естественной основностью, офлюсованный с основностью 1,0–1,2 по CaO/SiO_2 , высокоофлюсованный с основностью 1,4–1,8, железофлюс с основностью 3,0–5,0, промывочный агломерат с основностью 0,4–0,7, марганцевый агломерат с основностью 1,2–1,8.

Основным сырьем для получения агломерата являются железные руды различных месторождений в виде агломерационной руды. Кроме рудного сырья, в агломерационную шихту добавляют оборотный возврат агломерата, различные добавки — окалину прокатных цехов, колосниковую пыль доменных печей, уловленную в циклонах или электрофильтрах сухую пыль, обезвоженные и высушенные шламы мокрой газоочистки и пр. Приход вредных веществ в аглошихту, например P_2O_5 , ZnO и R_2O , контролируют (где R — щелочные металлы: Na, K).

При производстве офлюсованного агломерата необходимым компонентом являются флюсы — известняк и доломит для обеспечения необходимого химического состава шлака в доменной печи. Основным видом твердого топлива при спекании агломерационной шихты служит коксовая мелочь. Возможно применение заменителей — антрацита и тощих углей с небольшим количеством летучих веществ.

Мелкие руды, тонкоизмельченные концентраты, железосодержащие отходы производства поступают на накопительный или усреднительный склад агломерационного производства. В зимнее время смерзшиеся материалы предварительно размораживают в специальном гараже размораживания. Кусковые флюсы, известняк и доломит, измельчают, как правило, в молотковых или роторных дробилках, иногда в стержневых мельницах до крупности 0–3 мм. Твердое топливо дробят в четырех валковых дробилках также до крупности 0–3 мм. Все шихтовые компоненты поступают в бункеры шихтового отделения, где их в нужном соотношении весодозаторами дозируют на сборный ленточный конвейер.

Далее шихта направляется в смеситель барабанного типа для первичного смешивания, куда также дозируют горячий возврат для подогрева шихты, если работают по схеме с его выделением. Для устранения зоны переувлажнения при спекании шихты в барабане-окомкователе нагревают острым паром или сжиганием газа до температуры 55–65°С. После окомкования (грануляции) шихты во вторичных смесительных барабанах — окомкователях ее укладывают на спекательные тележки-паллеты слоем высотой от 200 до 650 мм в зависимости от качества окомкования, конструкции машины и состояния оборудования — газоотводящего тракта и эксгаустера. Полученный пирог спеченного агломерата дробят, охлаждают, отсеивают от него фракцию менее 5 мм. Для постели выделяют фракцию 8–15 мм. При работе с горячим возвратом фракцию с частицами неспекшейся шихты и кусочками агломерата менее 5 мм выделяют на грохотах после валковой дробилки горячего агломерата перед охладителем. Годный агломерат размером более 5 мм отправляют в доменный цех.

Основными требованиями к качеству агломерата являются:

- прочность на удар и истирание;
- минимальное количество фракции менее 5 мм;
- стабильность гранулометрического состава;
- стабильность химического состава, в том числе по содержанию FeO.

Содержание железа и основность агломерата по CaO/SiO_2 или по $(\text{CaO} + \text{MgO})/\text{SiO}_2$ на предприятиях регламентируют в зависимости от химического состава поступающего сырья на агломерационное производство, а также от состава всех компонентов доменной шихты. Основность агломерата устанавливают такой, чтобы основность конечного доменного шлака обеспечивала удовлетворительную его жидкотекучесть при выпуске продуктов плавки из печи, а также требуемое содержание серы в чугуне.

Производство чугуна

Чугунами принято называть сплавы железа с углеродом ($\text{Fe-Fe}_3\text{C}$) с содержанием углерода свыше 2% (в разное время это оценивали от 1,7% до 2,14%). Наименьшую температуру плавления (1148°С) имеет сплав без примесей с содержанием углерода 4,38% (эвтектический). В доменных печах в наибольшем количестве выплавляют чугун «передельный», предназначенный для передела в сталь или для переплавки в чугунолитейных цехах для производства различных отливок. Передельный чугун в зависимости от назначения выпускается трех видов:

- передельный коксовый для сталеплавильного производства марок П1 и П2 и для литейного производства марок ПЛ1 и ПЛ2;
- передельный коксовый фосфористый марок ПФ1, ПФ2 и ПФ3;
- передельный коксовый высококачественный марок ПВК1, ПВК2 и ПВК3.

Химические составы данных видов чугуна должны соответствовать техническим условиям ГОСТ 805–95 «Чугун передельный», который устанавливает марки, группы, классы и категории в зависимости от содержания кремния, марганца, фосфора и серы. По требованию потребителей к химическому составу передельного чугуна могут предъявляться дополнительные требования по содержанию углерода, меди, хрома и др., например, содержание кремния в чугуне марки П1 должно быть свыше 0,5% и до 0,9% включительно, в марке П2 до 0,5%; в марке ПЛ1 свыше 0,9% и до 1,2%, в марке ПЛ2 свыше 0,5 и до 0,9 включительно.

Кроме передельного чугуна в доменных печах выплавляют различные виды и марки литейных чугунов:

- литейный коксовый марок ЛК1; ЛК2; ЛК3; ЛК4; ЛК5; ЛК6; ЛК7;
- литейные легированные чугуны с повышенным содержанием некоторых металлов — хромоникелевые, титанистые, титаномедистые, ванадиевые.

Примерный химический состав чугуна: Si — 0,80%; Mn — 0,40%; S — 0,6%; Ti — 0,10%; P — 0,08%; Cr — 0,05%; C — 4,64%.

Передельный чугун с содержанием кремния 0,4% — 1,2% используют для выплавки стали, а литейный с кремнием свыше 1,2% поставляют на машиностроительные предприятия. При выплавке ванадийсодержащего чугуна на титаномагнетитовой шихте содержание кремния стараются держать около 0,2–0,3% для ограничения восстановления титана в чугуне. При азотсодержащем воздушном дутье образуются очень мелкие карбиды и нитриды титана, называемые гренали, которые не растворяются в чугуне и скапливаются между чугуном и шлаком, затрудняя обработку шлака на выпуске чугуна.

Вредными примесями в чугуне считаются фосфор и сера, причем при доменной восстановительной плавке удалить фосфор из чугуна невозможно. Серу удаляют повышением основности конечного шлака. Способствует удалению серы повышение содержания кремния в чугуне.

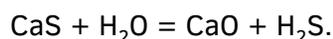
Шлак используют для производства строительных материалов и шлакопортландцемента. Побочной продукцией является колошниковый газ, который применяется для нагрева дутья в воздухонагревателях, основная часть которого подается в газовую сеть предприятия. Отходами производства являются скрап литейного двора, уловленная в сухом пылеуловителе колошниковая пыль, шламы системы мокрой очистки доменного газа. Пыль, уловленная в системе мокрой газоочистки, подается в виде шлама в специальные бассейны-отстойники, где шлам сгущается и откачивается со дна сгустителя, очищенная вода поступает в оборотный цикл водоснабжения.

Шламы системы мокрой газоочистки доменного процесса содержат повышенное количество цинка и щелочей, поэтому могут иметь ограниченное применение в рециклинге. Как правило, этот шлам выводится из оборота и размещается либо в прудах-отстойниках, либо в шламохранилищах.

Технологический процесс производства чугуна в доменной печи, схематично представленный на рис. 7.5, осуществляется в сложном комплексе агрегатов и оборудования, который включает:

- рудный двор с кранами-перегрузчиками для разгрузки и усреднения сырья;
- шихтовое отделение с бункерами для загружаемых в печь материалов;
- воздухонагреватели для нагрева дутья до 1000–1200°С (до 1400°С на воздухонагревателе конструкции Калугина);
- доменную печь с механизмами загрузки сырья и выдачи продуктов плавки;
- системы газоочистки;
- установки обработки шлака (придоменную грануляцию шлака или находящееся в отдалении от доменного цеха отделение по переработке шлака для получения щебня, граншлака или другой продукции);
- разливочные машины для разлива товарного чугуна.

Технологические операции процесса выплавки чугуна, как видно из рис. 7.6, сопряжены с эмиссиями загрязняющих веществ. Использование сухих материалов (кокса, агломерата, окатышей, железных руд, флюсов или их заменителей), обладающих к тому же абразивными свойствами, приводит к выделению пыли в местах перегрузок, при отсеивании мелочи на грохотах, при наборе материалов в весовую воронку в шихтовом отделении. При выпуске чугуна происходит активное выделение графитовой спели из чугуна и окисление струи металла. При охлаждении шлака водой из него выделяется H₂S, образующийся при взаимодействии сульфида кальция шлака с водой или влагой воздуха:



При нагреве дутья в доменных воздухонагревателях образуются дымовые газы с характерным для них составом в виде оксидов азота, оксида углерода, оксида серы.

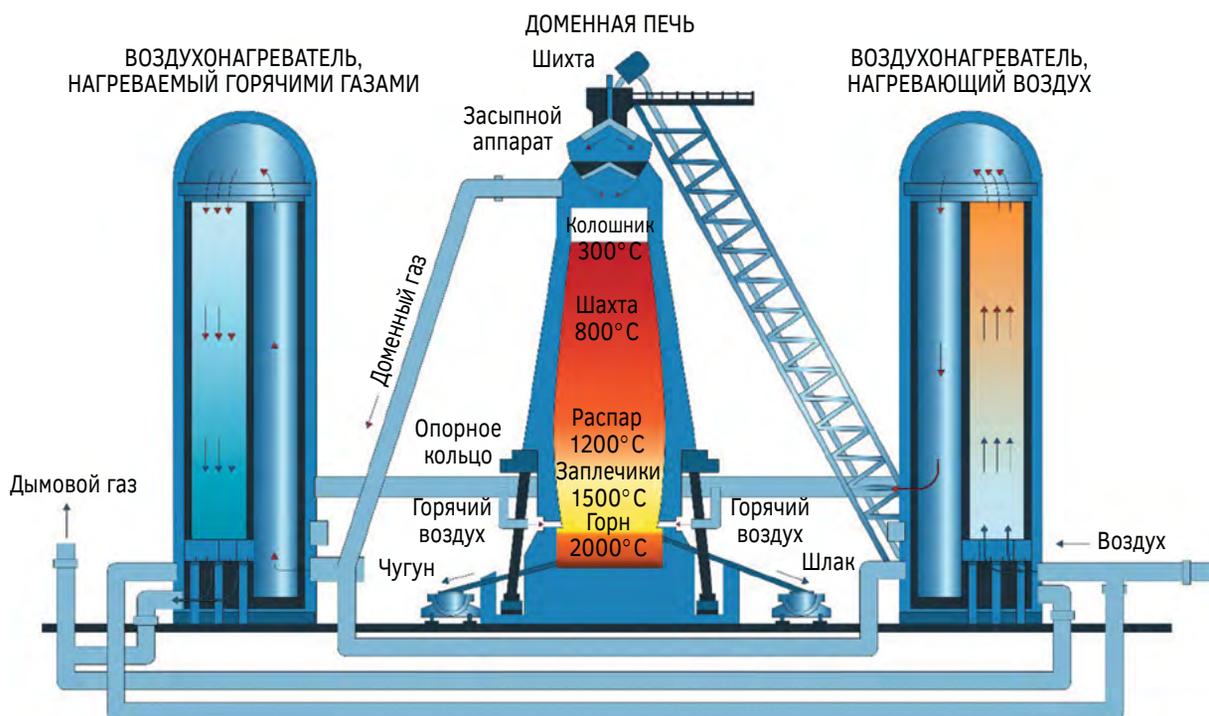


Рис. 7.6. Технологическая схема производства чугуна в доменной печи

Выплавка стали

Подготовка шихтовых материалов. В настоящее время перечень шихтовых и всевозможных материалов, используемых при выплавке стали в электропечах, весьма широк. Он включает в себя металлический лом, чугун, ферросплавы, шлакообразующие, огнеупоры и ряд других. Препятствием для выплавки отдельных марок стали может являться металлический лом, содержащий медь, олово и другие примеси, доля которого в металлошихте достигает 90–95%. В ряде случаев эта проблема решается разбавлением металлошихты металлизированным сырьем, чугуном, а также другими техническими приемами.

Металлолом в копровом цехе заранее сортируют по весу, по содержанию углерода, наличию легирующих элементов. Металлолом на плавку в ДСП, как правило, подается на платформах в контейнерах или загрузочных корзинах. Немагнитный лом для выплавки легированных марок стали подается в мульдах.

Необходимые для плавки ферросплавы в большинстве случаев поступают в шихтовый пролет в контейнерах или навалом в железнодорожных вагонах. Сыпучие материалы из железнодорожных вагонов разгружают в шихтовом пролете ЭСПЦ в специальные бункеры.

Для выплавки стали требуется большое количество сыпучих, порошкообразных и шлакообразующих материалов: свежееобожженная кусковая известь, плавиковый шпат, шамотный бой, кварцевый песок, боксит, железную руду, кокс, молотый ферросилиций, алюминиевый порошок. Эти материалы перед использованием должны быть просушены и прокалены для удаления гигроскопической и гидратной влаги, влияющей на образование флокенов и волосовин из-за попадания в сталь водорода. Прокаливание ведут в специальных печах или мульдах рядом с дуговой печью. Дробление и подготовку сыпучих и порошкообразных материалов ведут в отдельных, рядом стоящих зданиях.

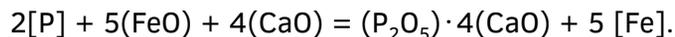
Шлакообразующие материалы и ферросплавы доставляются в печной пролет из шихтового отделения мостовым краном в мульдах или в саморазгружающихся бадьях, а на ряде заводов через бункерную эстакаду по системе ленточных конвейеров.

Подготовка печи. После каждой плавки подина и откосы печи осматриваются, очищаются перед очередной плавкой и заправляются порошкообразным обожженным магнезитом, а при работе с оставлением части металла от предыдущей плавки — заправляются только откосы. Осуществляется подача к печи электродов и их наращивание.

Завалка шихты. Завалка шихты осуществляется в печь при открытом своде бадьями с открывающимся днищем, завалка флюсов и добавок — через бункера с дозирующими устройствами. Жидкий чугун в печь заливают при помощи специального желоба.

Плавка. Плавление шихты ведут на максимальной мощности печного трансформатора с использованием газокислородных горелок. Для ускорения плавления шихты поворачивают корпус печи вокруг оси в одну и другую стороны на 45°. На современных печах повороты не нужны, так как проплавляется один колодец. К окончанию расплавления ванна должна быть покрыта слоем шлака. Шлак периода расплавления имеет примерный состав: 35–45% CaO; 15–25% SiO₂; 5–10% MnO; 10–12% MgO; 4–7% Al₂O₃; 10–15% FeO; до 0,5% P₂O₅ (основность 1,5–2,0). Скачивание и уборка шлака производятся через окно под печь самотеком или специальными скребками.

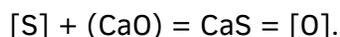
Окислительный период. В современных печах при активном использовании кислорода, которое начинается на стадии плавления металлошихты, период расплавления совмещен с окислительным периодом. Основная задача окислительного периода заключается в окончательном удалении фосфора. Начинается этот процесс при расплавлении порядка 70–80% металлошихты при активном сходе шлака. Для создания благоприятных условий дефосфорации необходимо обеспечить требуемую окисленность ванны, которая достигается за счет активной продувки расплава кислородом и снижением содержания углерода в металле до значений 0,1–0,05% и менее. При этом основность шлака должна быть на уровне 2–3. Окисление фосфора протекает по реакции:



Для протекания реакции окисления фосфора необходимы: высокое содержание кислорода в металле и шлаке, повышенное содержание CaO в шлаке и пониженная температура в реакционной зоне. Выполнение этих условий обеспечивают наводкой свежего шлака и постоянным обновлением шлака путем скачивания из печи насыщенного (CaO)₄ · P₂O₅ шлака. По ходу окислительного периода происходит дегазация стали — удаление из нее водорода и азота, которые выделяются в пузыри CO, проходящие через металл. Выделение пузырьков CO сопровождается удалением из металла неметаллических включений, которые выносятся на поверхность потоками металла или поднимаются вверх вместе с пузырьками газа. Хорошее кипение ванны обеспечивают перемешивание металла, выравнивание температуры и химического состава.

К концу окислительного периода шлак имеет примерный состав: 40–45% CaO; 10–20% SiO₂; 10–20% FeO; 5–19% MgO; 2–4% Al₂O₃; 0,5–2,0% P₂O₅ (основность 2,5–4,0). Общая продолжительность окислительного периода зависит от мощности трансформатора и продувочных устройств. На лучших печах время выплавки полупродукта в дуговой электрошлаковой печи (ДСП) составляет 35–50 мин.

Восстановительный период. После окислительного периода проводят полное скачивание шлака для удаления из печи фосфора. Далее плавку ведут под восстановительным белым шлаком, содержащим менее 0,5% FeO. В этот период происходит диффузионное раскисление металла, завершается десульфурация до требуемого содержания серы, легирование металла и регулирование его температуры перед выпуском. Десульфурация металла активно проходит в восстановительный период плавки, а также при выпуске стали под слоем шлака, когда происходит хорошее перемешивание металла со шлаком:



Десульфурации способствует хорошее раскисление стали и шлака, высокое содержание извести в шлаке и высокая температура.

В цехах, оборудованных агрегатами «ковш-печь», операции окислительного и восстановительного периодов, раскисления и легирования выполняются в одну стадию.

Ковшевая металлургия. Для увеличения производительности дуговых печей, уменьшения угара ферросплавов процессы раскисления, легирования, рафинирования и доводки металла до нужной температуры проводятся не в печи, а в сталеразливочном ковше и/или специальных агрегатах. Применение такой технологии также положительно сказалось на улучшении качества стали и свойствах металлопродукции — механических свойствах, коррозионной стойкости и др. Внепечная обработка стали («ковшевая металлургия») стала широко применяться для любых марок стали. Были разработаны простые (одним методом) и комбинированные способы внепечной обработки стали одновременно несколькими методами:

- в обычном сталеразливочном ковше;
- в сталеразливочном ковше, оборудованном для вдувания газа или газопорошковой струи снизу через смонтированные в днище устройства;
- в установке «ковш-печь» с крышкой (сводом), через которую опущены электроды, нагревающие металл в процессе его обработки (при этом, установка оборудована системой подачи ферросплавов из бункеров или микродобавок порошковой проволокой);
- в агрегате типа конвертера с продувкой металла кислородом, аргоном (агрегат аргоно-кислородного рафинирования);
- в агрегате типа конвертера, снабженном оборудованием для вакуумирования;
- в вакууматорах различного типа.

При продувке инертным газом (аргоном или азотом) через отверстие в днище ковша происходит очищение металла от газовых и неметаллических включений, имеет место перемешивание металла и усреднение его состава. Если необходимо понизить содержание углерода в металле, то к инертному газу добавляют кислород. Продувкой жидкого металла инертным газом регулируют температуру металла.

Для интенсификации рафинирования металла от серы, фосфора и кислорода применяют перемешивание металла с жидким синтетическим шлаком, который наводится при использовании твердых шлаковых смесей. Для снижения содержания серы в металле и его раскисления используют известково-глиноземистый шлак, для дефосфорации — известково-железистый. Рафинирование проводят путем смешивания нагретого до 1600°С синтетического шлака со струей металла, сливаемого из печи в сталеразливочный ковш. Рафинирование металла синтетическим шлаком можно совмещать с одновременной продувкой инертным газом или вакуумированием.

В настоящее время установка для внепечной обработки жидкой стали превратилась в многофункциональный агрегат «ковш-печь», позволяющий производить нагрев металла с помощью трех вводимых электродов, дозировать кусковые ферросплавы, флюсы или различные добавки (углерод, раскислители, модификаторы), в том числе с применением порошковой проволоки.

Для повышения чистоты металла по неметаллическим включениям и содержанию газов проводят вакуумирование стали в вакууматоре.

С разделением операций получения жидкой стали и ее внепечной обработки общая продолжительность плавки составляет 1,5–2,0 ч, обработка на каждом агрегате не превышает 40–50 мин, что позволяет организовать разливку стали на машине непрерывной разливки стали по схеме «плавка на плавку». Удельный расход электроэнергии на установке «ковш-печь» — 30–40 кВт·ч/т, расход электродов 0,2–0,3 кг/т стали.

Технологическая схема производства стали представлена на рис. 7.7.

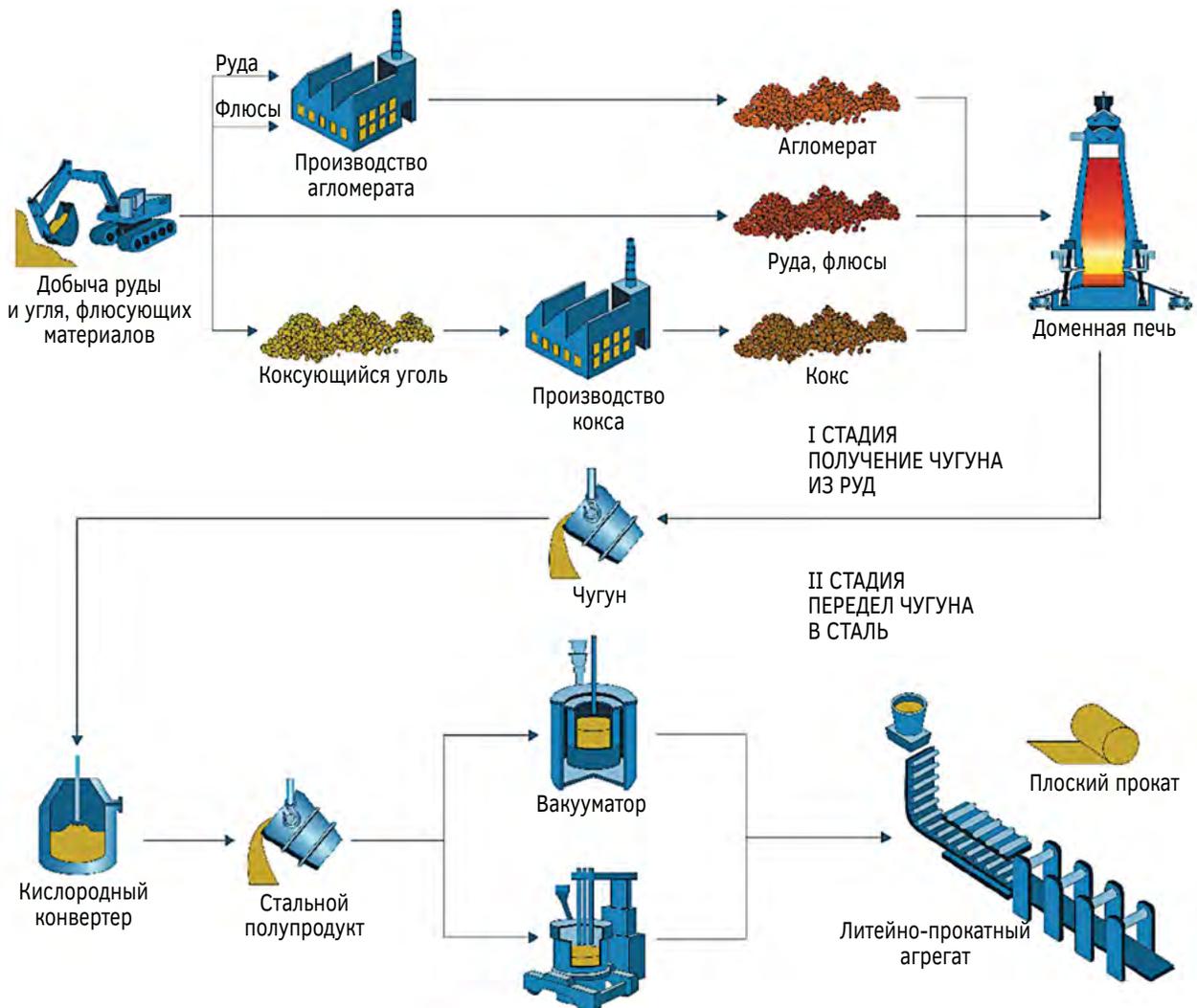


Рис. 7.7. Технологическая схема производства стали

СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ

Производство стали в кислородных конвертерах

Процесс производства стали в кислородном конвертере является источником выбросов пыли при первичном и вторичном обеспыливании, предварительной обработке жидкого металла и внепечной обработке стали, а также образования твердых отходов (побочных продуктов) и сточных вод от мокрого обеспыливания и от непрерывной разливки.

Потребление ресурсов

Таблица 7.4. Удельное потребление ресурсов в конвертерном производстве отрасли (по данным анкетирования)

Потребление электроэнергии, кВт·ч/т	Топливо — природный газ, м ³ /т	Технологические газы (кислород), м ³ /т	Потребление воды, м ³ /т
			техническая вода на технологические нужды (в т. ч. оборотных циклов)
19,04–2,4	1,09–11	60–132	0,94–24

Удельное потребление технической воды на процесс (в т. ч. оборотных циклов) определяется потребностями процесса, при этом водооборот организован либо на основе локальных оборотных циклов, либо в замкнутой системе водооборота предприятия.

Таблица 7.5. Удельный расход сырья в конвертерном производстве отрасли (по данным анкетирования)

Сырьевые материалы	Расход, кг/т
Чугун	472–1082
Лом	20–585
Известь	31–72,3
Известняк	0,04–8,174
Доломит	5,2–50,4
Окатыши	1,9
Ферросплавы	5,6–19
Скрапы	59,5
Стружка	17,0
Окалина	76
Кокс	0,04–0,4
Коксовая мелочь	0,161–2,83
Угли	5,24–16,84
Агломерат	0,01–1,25
ВСЕГО:	1153–1237

Выбросы в атмосферу. Конвертерное производство стали является источником выбросов пыли, газовых компонентов, образования твердых отходов/побочных продуктов и сточных вод.

Выбросы при работе кислородных конвертеров образуются в ходе:

- загрузки конвертеров шихтовыми материалами;
- продувки шихты кислородом;
- выпуска жидкой стали и шлака из конвертера.

Неорганизованные (рассеянные) выбросы происходят в течение всех перечисленных процессов, когда отходящие газы не полностью улавливаются.

Таблица 7.6. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу в конвертерном производстве отрасли

Наименование загрязняющих веществ	Масса загрязняющих веществ в отходящих газах после очистки, г/т продукции
CO	1979–5651
NO ₂	28–320
NO	6–70
SO ₂	15–290
Пыль неорганическая суммарно	113–350

Основным отходящим газом является конвертерный газ, последующее его удаление и обеспыливание рассматриваются как приоритетные мероприятия.

Концентрации загрязняющих веществ в выбросах после мокрой очистки составляют [мг/м³]: NO₂ — 94–100; NO — 44–47; CO — 5700–6090; SO₂ — 8,3–8,8.

Выбросы от всех других источников, связанные с процессами выплавки стали в кислородном конвертере, рассматриваются как вторичные отходящие газы и выбросы системы вторичного обеспыливания. Выбросы от предварительной обработки расплава металла удаляются и очищаются отдельно.

Приоритетными веществами в выбросах конвертерного производства являются оксид углерода и пыль неорганическая (взвешенные вещества), меры по снижению выбросов в первую очередь направлены на выбросы пыли.

Отходы и побочные продукты. Основной перечень отходов производства, образующихся при выплавке, обработке и разливе стали представлен ниже, кг/т жидкой стали:

- конвертерный шлак — 85–165;
- шлак от десульфурации — 3–21 (данный шлак частично используется при строительстве полигонов или просто размещается на полигонах промышленных отходов);
- мелкая и грубая пыль — 0,75–24;
- шлак от внепечной обработки — 9–15 (возможно применение в производственном рециклинге);
- брызги металла — 2,8–15;
- шлак при непрерывной разливке — 4–5;
- окалина при непрерывной разливке на МНЛЗ или в изложницы — 2,3–6,4.

Таблица 7.7. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу в конвертерном производстве отрасли

Наименование отхода	Объем образования, кг/т продукции	Обращение с отходами
Шлак конвертерного производства	114,6–191,8	– Рециклинг в сталеплавильном производстве; – Использование при ликвидации горных выработок; – Использование для дорожного строительства
Окалина при непрерывном литье заготовок	Нет данных	Рециклинг — вторичное использование в качестве металлошихты
Скрап чугунный незагрязненный	Нет данных	
Скрап стальной незагрязненный	11–34	
Лом и отходы, содержащие незагрязненные черные металлы в виде изделий, кусков, несортированные	9,58–24,1	
Отходы (осадки) механической очистки (осветления) воды систем мокрой газоочистки производства стали с преимущественным содержанием оксидов железа	11,72–22,29	Реализация в качестве побочной продукции
Отходы (осадки) механической очистки (осветления) воды систем мокрой газоочистки производств стали с преимущественным содержанием оксидов кальция и алюминия	0,56–17,82	– Рециклинг — утилизация в процессе агломерации; – Переработка для собственных нужд; – Реализация сторонним организациям

Таблица 7.7 (окончание)

Наименование отхода	Объем образования, кг/т продукции	Обращение с отходами
Лом футеровок печей и печного оборудования производства черных металлов	2,95–17,06	– Рециклинг — утилизация в огнеупорном производстве; – Использование при ликвидации горных выработок
Пыль газоочистки неорганизованных выбросов конвертерного производства	0,27–5,65	– Рециклинг — утилизация в процессе агломерации; – Переработка для собственных нужд; – Реализация сторонним организациям
Пыль газоочисток при десульфурации чугуна	0,2	Переработка для собственных нужд или реализация
Пыль миксерного отделения (пыль чугунная)	0,002–0,13	Переработка для собственных нужд или реализация
Отходы известняка, доломита и мела в кусковой форме практически неопасные	1,9–311	Утилизация в процессе агломерации

Переработка конвертерных шлаков является обязательным элементом безотходной технологии, так как позволяет исключить образование отвалов и связанное с этим отчуждение сельскохозяйственных угодий, устранить неизбежное в условиях шлаковых отвалов образование пыли, загрязнение водного и воздушного бассейнов.

Основными путями утилизации конвертерных шлаков являются извлечение из них металла, фракционирование, использование в производственном рециклинге (для интегрированных предприятий — в агломерационном и доменном производствах), в глобальном рециклинге (для дорожного строительства, промышленного и гражданского строительства, для производства цемента), в качестве материалов для рекультивации.

Ввиду востребованности шлаковой продукции конвертерные шлаки имеют статус побочной продукции, а не отхода.

Производство стали в электродуговых печах

Потребление ресурсов. При производстве стали в электродуговых печах основными источниками энергии являются электроэнергия и природный газ. Общее потребление энергии на входе для данного технологического процесса составляет 2300–2700 МДж/т произведенной стали, из которых 1250–1800 МДж/т приходится на электроэнергию. Затраты кислорода составляют 24–56 м³/т стали.

За последние 40 лет использование физического тепла отходящих газов электродуговой печи достигло 140 кВт·ч/т жидкой стали, в основном расходуемого на нагрев лома (приблизительно до 800°С), что снижает потребление энергии на 100 кВт·ч/т жидкой стали. Таблица 7.8 иллюстрирует потребление ресурсов в отрасли при производстве стали в электродуговых печах.

Расход технической воды на процесс (в том числе оборотных циклов) находится в диапазоне от 61 до 210 м³/т продукции, однако основная часть этой воды почти полностью находится в замкнутом водооборотном цикле, который составляет 98,8–100%.

Таблица 7.8. Удельное потребление ресурсов в отрасли при производстве стали в электродуговых печах (по данным анкетирования)

Потребление электроэнергии, кВт·ч/т	Топливо — природный газ, м ³ /т	Технологические газы (кислород), м ³ /т	Потребление воды, м ³ /т	
			техническая вода на технологические нужды (в т. ч. оборотных циклов)	«свежая» вода
312–590	10–52	32–71	61–210	0,06–7,3

Таблица 7.9. Удельный расход сырья при производстве стали в электродуговых печах в отрасли (по данным анкетирования)

Сырьевые материалы	Расход, кг/т
Лом	559–1126
Чугун	3,7–542
Скрап	16,3–59,5
Ферросплавы	10,8–21,4
ГБЖ	15,8–19
Окатыши	16,8
Коксовая мелочь	12–19,3
Кокс	0,3–2,9
Известь	54,4–61,2
Известняк / доломит	0,3–51,8
Стружка	17
Легирующие	7,6
Окалина	6,8
ВСЕГО:	1102–1274

Выбросы в воздух. Источниками выбросов в электросталеплавильном производстве являются собственно электродуговая печь, машины непрерывного литья заготовок, а также дополнительные агрегаты, предназначенные для обеспечения процесса плавки (стенды сушки и разогрева стальной и промежуточных ковшей, печи-ковши, установки вакуумирования стали).

Отходящие газы электродуговой печи квалифицируются как первичные выбросы и составляют ~ 95% общих выбросов процесса. Первичные выбросы отбираются из четвертого отверстия с патрубком для газоотсоса (в случае трех электродов — печи на переменном токе) или из второго отверстия с патрубком для газоотсоса (в случае одного электрода — печи на постоянном токе). Существуют также электродуговые печи без четвертого отверстия, которые снабжены шумопылезащитным кожухом с полным закрытием печи и с отводом газа из-под кожуха. Отходящие газы, которые образуются при разделке лома, загрузке шихты и выпуске плавки, а также при выбросах из печных отверстий, улавливаются с помощью вытяжного зонта, обычно размещаемого выше печи (или в районе крыши), и идентифицируются как вторичные выбросы. В зависимости от размеров здания и мощности печи расход газов в системе аспирации может превышать 1 млн м³/ч.

Таблица 7.10. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу при производстве стали в электродуговых печах в отрасли

Наименование ЗВ	Технологический этап / Источник выброса	Масса загрязняющих веществ в отходящих газах после очистки		
		диапазон, г/т	среднее, г/т	
NO ₂	Подготовка стальной заготовки	0,1–10,7	3,6	
NO		0,1–1,74	0,7	
CO		0,4–18,1	7,7	
SO ₂		0,14–1,24	0,7	
NO ₂	Печь-ковш	6–9,8	7,9	
NO		1–3,48	2,2	
CO		–	0,017	
Пыль неорганическая	Труба Вентури, каплеуловитель	0,105–4	1,9	
MgO		1–2	1,5	
Mn и его соедин.		0,1–1,43	0,8	
NO ₂		ДСП	8,5–552,9	281
NO	2,5–257,4		–	
CO	270–4499		2910	
SO ₂	4–335		41	
Пыль неорганическая суммарно	Очистка сухая: Фильтр рукавный		140–749,4	500
MgO	1,5–7,6		4,4	
Mn и его соединения	1–17		6,4	
Fe ₂ O ₃	9–230		85,7	
	Разливка стали (МНЛЗ)		–	–
			–	–
CO		0,36–3,8	2,1	
Пыль неорганическая		Фильтр рукавный	–	5,9
Mn и его соединения		–	0,09	
NO ₂	Установка внепечной обработки стали (УВОС)	67,9–80	73,9	
NO		–	11	
CO		30–52,8	41,4	
Пыль неорганическая суммарно		Очистка сухая: Фильтр рукавный	3,9–91	53
MgO		–	3,8	
Mn и его соединения		–	2,1	
Fe ₂ O ₃		–	23	

В электросталеплавильном производстве из-за периодического режима плавки имеют место так называемые технологические выбросы, достаточно сложно эвакуируемые.

Отходы и побочные продукты. Производственные остатки (отходы и побочные продукты) включают электросталеплавильный шлак, шлак внепечной обработки, пыль систем газоочисток, отходы огнеупорных материалов от ремонта печей и печного оборудования и являются, в основном, малоопасными и практически неопасными отходами (IV и V классов опасности).

Таблица 7.11. Обращение с отходами электросталеплавильного производства в отрасли (по данным анкетирования)

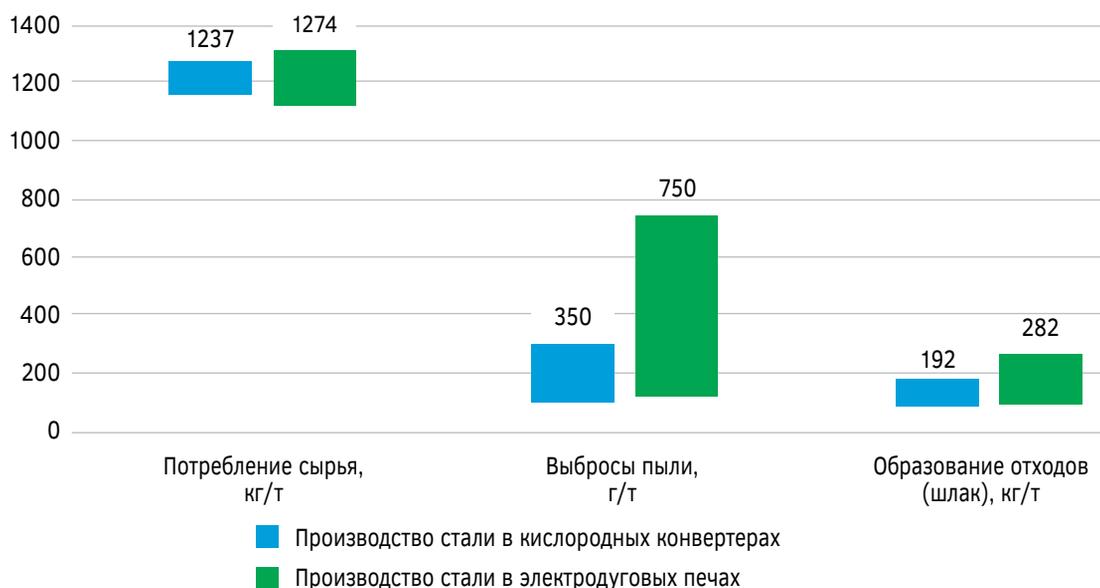
Наименование отхода	Объем образования, кг/т продукции		Обращение с отходами
	среднее	диапазон	
Шлак электросталеплавильный	197,7	127–282	– Рециклинг — в сталеплавильном производстве; – Переработка в шлаковый щебень; – Использование для ликвидации горных выработок; – Использование в производстве цемента; – Использование в качестве инертного материала на полигоне
Скрап стальной, незагрязненный	49,5	43–56	Рециклинг — в сталеплавильном производстве
Лом и отходы, содержащие незагрязненные черные металлы в виде изделий, кусков, несортированные	28,8	0,88–82,6	Рециклинг — в сталеплавильном производстве
Отходы известняка, доломита и мела в кусковой форме, практически неопасные	21,6	0,116–43	Использование сторонними организациями при производстве строительных материалов
Пыль газоочистки черных металлов, незагрязненная	15,8	12,9–18,8	– Размещение на полигоне (90%); – Использование при создании инертного слоя при рекультивации полигонов
Пыль аспирации электросталеплавильного производства	14,7	0,12–41	– Рециклинг — переработка в окатыши железосодержащие; – Рециклинг — в качестве железосодержащей добавки при производстве агломерата; использование для ликвидации горных выработок; – Размещение на ОРО; – Передача сторонним организациям
Окалина при непрерывном литье заготовок	6,6	0,02–18,7	Рециклинг — в агломерационном и/или сталеплавильном производстве; передача сторонним организациям
Лом футеровок печей и печного оборудования производства черных металлов	4,3	2,3–6,6	– Сортировка, извлечение металлоскрапа; – Рециклинг — при выплавке стали; – Использование в собственном производстве полученных огнеупорных порошков
Электроды графитовые отработанные, не загрязненные опасными веществами	0,2	0,03–0,92	– Рециклинг — в качестве добавочного материала; – Повторное использование после восстановления резьбы; – Передача сторонним организациям

Сравнение технологий производства стали

	Потребление электро- энергии, кВт·ч/т	Потребление топлива, м³/т	Потребление воды, м³/т
Производство стали в кислородных конвертерах	19–24	1–11	1–24
Производство стали в электродуговых печах	312–590	10–52	61–210



	Потребление сырья, кг/т	Выбросы пыли, г/т	Образование отходов, кг/т
Производство стали в кислородных конвертерах	1153–1237	113–350	114–192
Производство стали в электродуговых печах	1102–1274	140–750	127–282



РОЛЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В ГЛОБАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКЕ

В металлургический комплекс входят черная и цветная металлургия. Металл, несмотря на снижение металлоемкости продукции во всем развитом мире, остается основным конструкционным материалом. Металлургия России, обеспечивая производство и научно-техническое развитие практически всех отраслей промышленности, базируется на отечественных сырьевых ресурсах и ориентируется как на зарубежного, так и на российского потребителя. Из недр России извлекается 10% каменного угля, 14% товарной железной руды, 10–15% цветных и редких металлов от всего объема этих полезных ископаемых, добываемых мировым сообществом. Черная металлургия в первую очередь служит базой для развития машиностроения и металлообработки России. Продукция черной металлургии находит применение практически во всех сферах современной экономики. Эта отрасль тяжелой промышленности охватывает такие стадии технологического процесса, как добыча, обогащение и агломерация руд черных металлов, производство огнеупоров, добыча нерудного сырья для черной металлургии, коксование угля, производство чугуна, стали, проката, ферросплавов, вторичный передел черных металлов, добыча вспомогательных материалов, изготовление металлических изделий производственного назначения и др.

Начиная с 2000 г., тенденции развития отечественной черной металлургии кардинально изменились: объем инвестиций в 2016 г. вырос в 7,4 раза по сравнению с 2000 г., общий объем инвестиций в отрасль за период 2000–2016 гг. составил около 2,04 трлн руб. Динамика инвестиций в черную металлургию России представлена на рис. 7.8.

Но основу черной металлургии составляет производство чугуна, стали и проката. По добыче железной руды, выплавке чугуна, производству кокса Российская Федерация занимает одно из ведущих мест в мире. Крупнейшими потребителями продукции черной металлургии являются машиностроение и металлообработка, строительная индустрия, железнодорожный транспорт. Самым тесным образом черная металлургия связана с химической и легкой промышленностью.

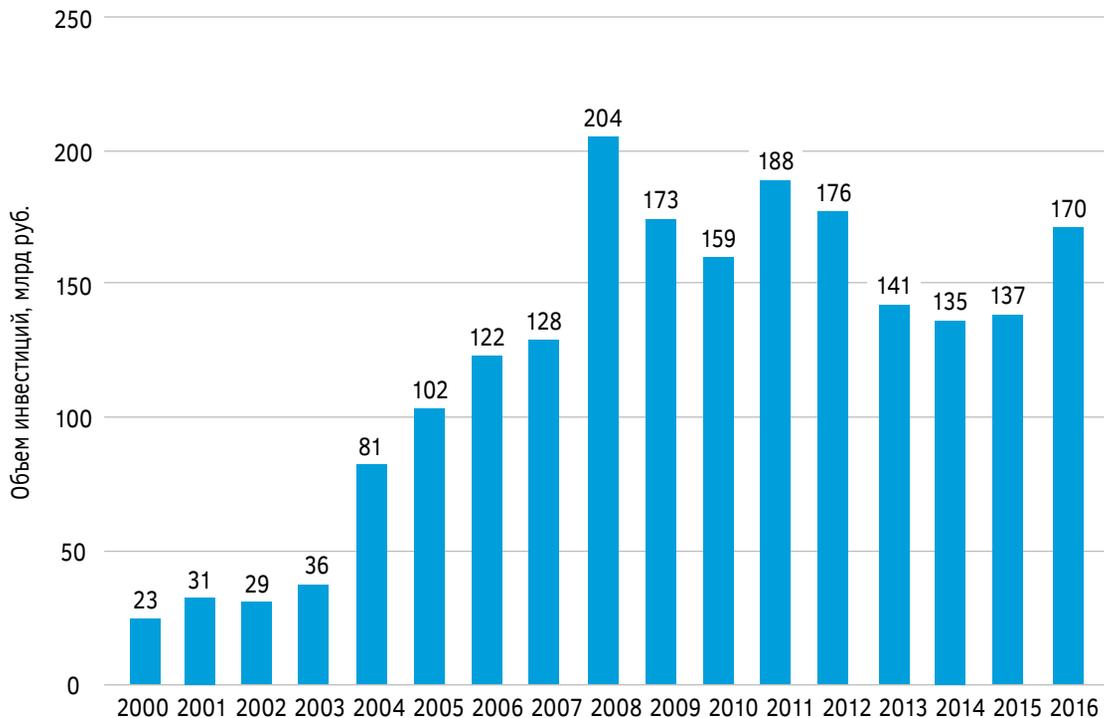


Рис. 7.8. Динамика инвестиций в черную металлургию России

Черная металлургия, являясь одной из базовых отраслей, вносит существенный вклад в экономику России.

За 2016 г. использование мощностей по производству готового проката составило 80,4%, по производству стали — 82,2%, по производству чугуна — 83%. Данная загрузка производственных мощностей сопоставима с показателями основных зарубежных металлургических компаний-производителей черных металлов.

В 2016 г. из расчетных данных по материалам Росстата доля черной металлургии составляла в ВВП страны — около 1,4%, в промышленном производстве — 5,7%, в валютных поступлениях в экономику России — 6,1%. Как потребитель продукции и услуг субъектов естественных монополий черная металлургия использует 11,5% электроэнергии, более 17,3% природного газа в промышленном производстве России, ее доля в грузовых железнодорожных перевозках составляет 15%. Доля черной металлургии в экономике России в 2016 г. показана на рис. 7.9.

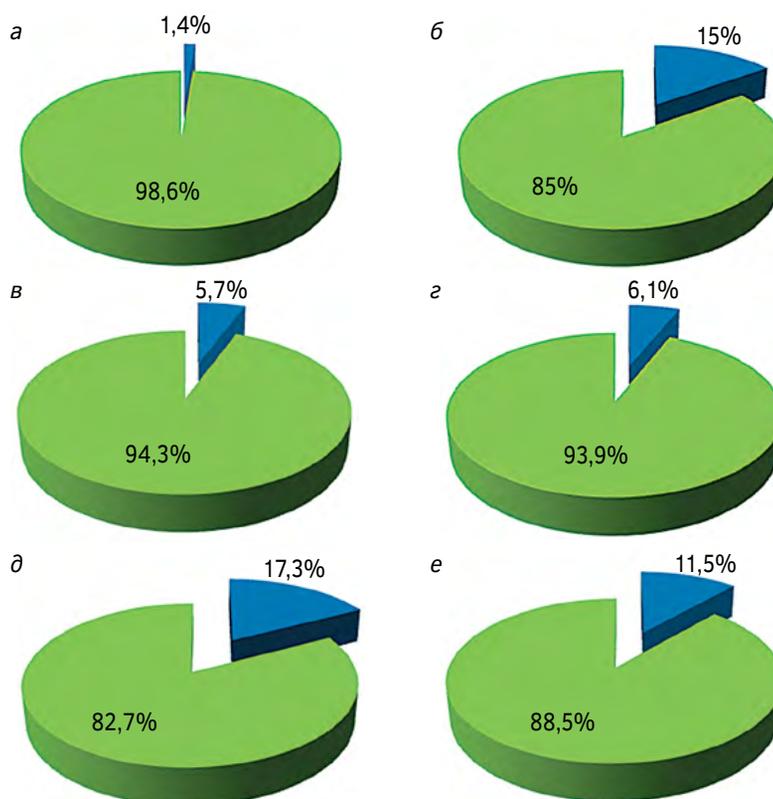


Рис. 7.9. Доля черной металлургии в экономике России в 2016 г.:

- а) в ВВП; б) в грузовых железнодорожных перевозках; в) в промышленном производстве; г) в валютных поступлениях в экономику России; д) в потреблении природного газа в промышленном производстве России; е) в потреблении электроэнергии в промышленном производстве России

Благодаря инвестициям износ основных средств снизился с 53,5% — в 2000 г. и до 42% — в 2015 г.

Россия занимает 5-е место в мире по производству стали (уступая Китаю, Японии, Индии и США), 2-е место по производству стальных труб (уступая Китаю), 3-е место по экспорту металлопродукции (уступая Китаю и Японии), 5-е место по производству товарной железной руды (после Китая, Австралии, Бразилии и Индии).

Номенклатура продукции черной металлургии России включает около 4 тыс. горячекатаных сортовых профилей, 20 тыс. типоразмеров листа, 2 тыс. гнутых и фасонных профилей, 30 тыс. профилеразмеров труб и 50 тыс. типоразмеров метизов.

Вся эта продукция состоит более чем из 2500 марок стали и сплавов и производится около 14 млн маркопрофилеразмеров.

Динамика структуры производства основных видов продукции черной металлургии в России представлена на рис. 7.10.

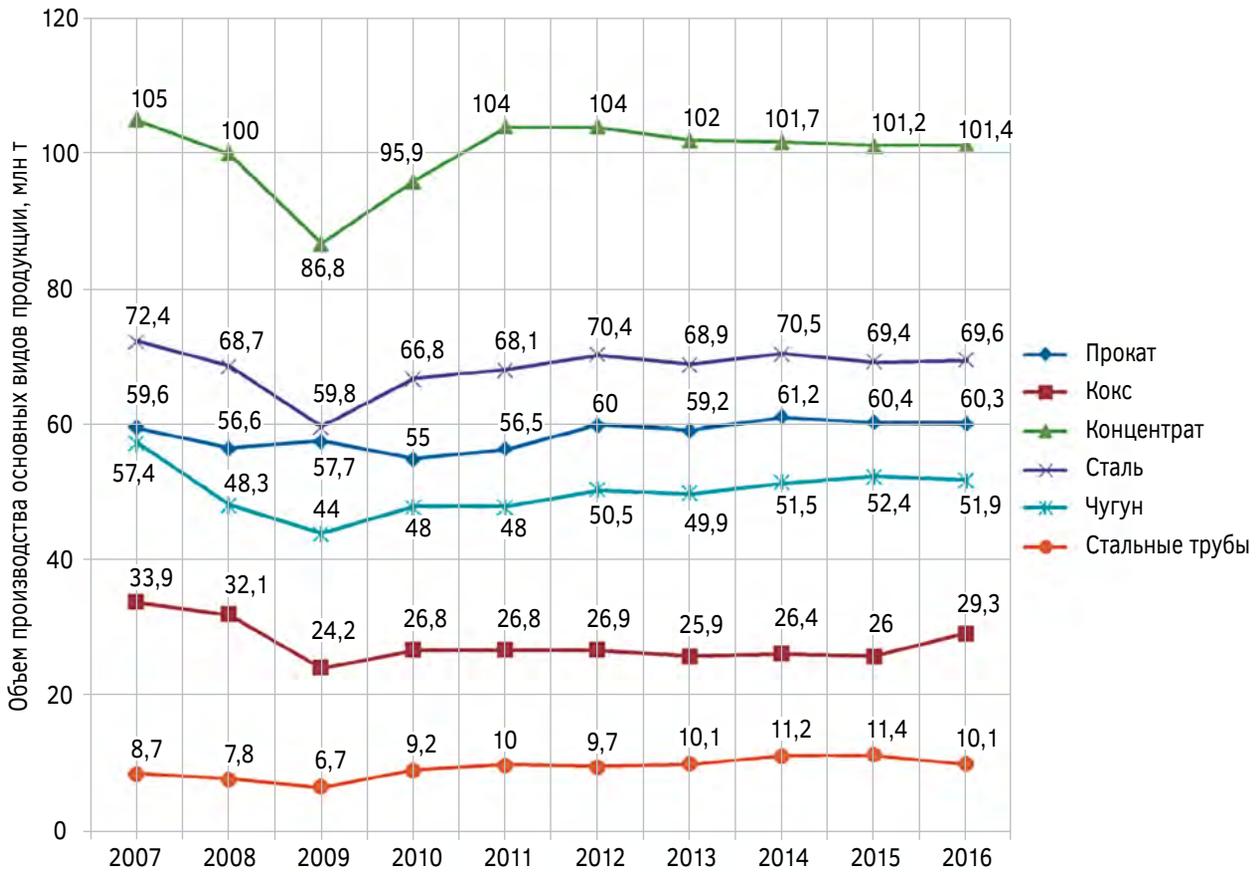


Рис. 7.10. Динамика производства основных видов продукции черной металлургии в России

Чугун выплавляется в доменных печах. Средняя удельная производительность печей увеличилась за период 2000–2015 гг. на 19%, а средний удельный расход кокса снизился примерно на 12%.

Сталь производится в конвертерах (66,5%), в электропечах (31,5%) и в мартеновских печах (2,0%). Динамика структуры выплавки стали по видам производства в России представлена на рис. 7.11.

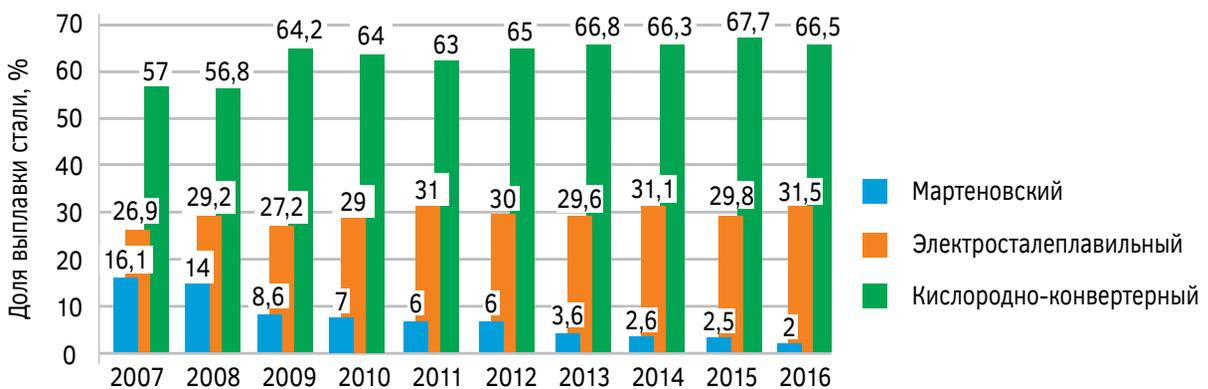


Рис. 7.11. Динамика структуры выплавки стали по видам производства в России

Изменения за период 2000–2016 гг. в сортаменте производимого готового проката в целом по отрасли характеризуются следующими данными, представленными в табл. 7.12.

Таблица 7.12. Сортамент производимого готового проката

Вид продукции	2000 г.		2016 г.	
	Объем производства, млн т	Доля в объеме производства, %	Объем производства, млн т	Доля в объеме производства, %
Готовый прокат:	46,7	100	60,3	100
– заготовки для переката на экспорт	11,8	25,3	14,1	24,0
– сортовой прокат	14,6	31,2	18,5	31
– листовой прокат, в т. ч.:	20,3	43,5	27,5	45
• холоднокатаный листовой прокат	6,4	31,6	8,1	29,1
• холоднокатаный листовой прокат с покрытиями	1,4	21,9	5,5	67,5

Увеличились объемы производства листового проката и холоднокатаного листа, в 3 раза выросла доля листового проката с покрытиями.

Динамика укрупненной структуры готового проката за период 2007–2016 гг. показана на рис. 7.12.

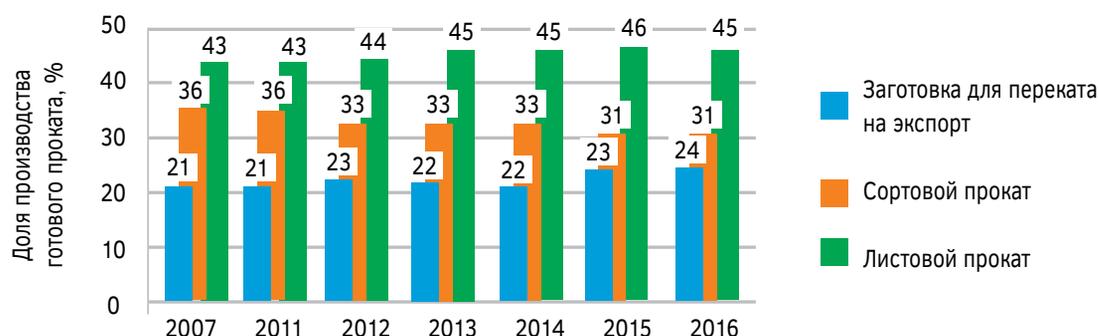


Рис. 7.12. Динамика укрупненной структуры производства готового проката

Производство, экспорт, импорт и потребление готового проката в РФ иллюстрируются динамикой производства стали, проката и объемами его потребления, представленными в табл. 7.13.

Таблица 7.13. Производство, внешняя торговля и потребление готового проката в РФ

Показатели	Годы									
	2000	2005	2007	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Производство, млн т	46,7	54,7	59,6	55,0	56,5	60,0	59,2	61,2	60,4	60,3
Экспорт, млн т*	27,0	29,9	28,0	29,3	24,8	26,9	24,8	25,4	28,0	28,9
Импорт, млн т*	1,8	4,0	6,4	5,2	6,4	6,0	6,0	5,3	5,1	2,4
Видимое потребление, млн т	21,5	28,8	38,0	30,9	38,1	39,1	40,4	41,1	37,4	33,8
Доля экспорта в производстве, %	57,8	54,7	47,0	53,3	43,9	44,8	41,9	41,5	46,4	47,9
Доля импорта в потреблении, %	8,4	13,9	16,7	16,8	16,8	15,3	14,8	12,9	13,6	7,1

* Показатели экспорта и импорта приведены с учетом листа и жести с покрытием.

Тенденции в мировом производстве

Эксперты EIU пересмотрели свою оценку роста мирового производства стали в 2017 г. до 3,8% (ранее они прогнозировали 5,5%) в соответствии с последними данными за весь год, опубликованными Всемирной ассоциацией стали (WSA). Тем не менее ускорение темпов роста производства, начавшееся во второй половине 2017 г., сопровождается ростом прибыли сталелитейных компаний, продолжилось в первой половине 2018 г. В январе-июле 2018 г. производство стали в мире выросло на 5,2% г/г и на 6,4% г/г в Китае. Однако во второй половине 2018 г. ожидается замедление темпов роста производства. EIU прогнозирует рост мирового производства стали на 4,3% в 2018 г. В следующем году рост процентных ставок будет препятствовать накоплению запасов и ослабит мировой спрос на сталь. Таким образом, производство стали в 2019 г., по прогнозам, вырастет всего на 0,5%.

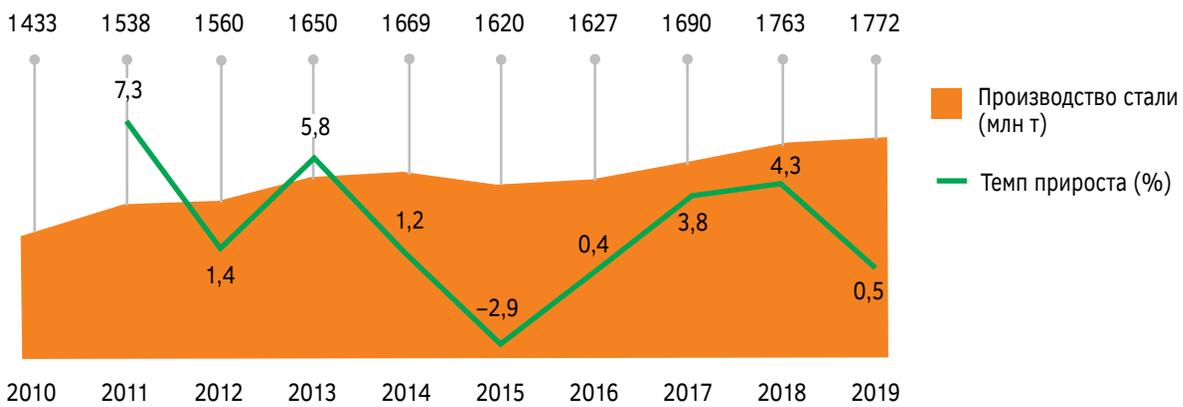


Рис. 7.13. Динамика производства стали в мире

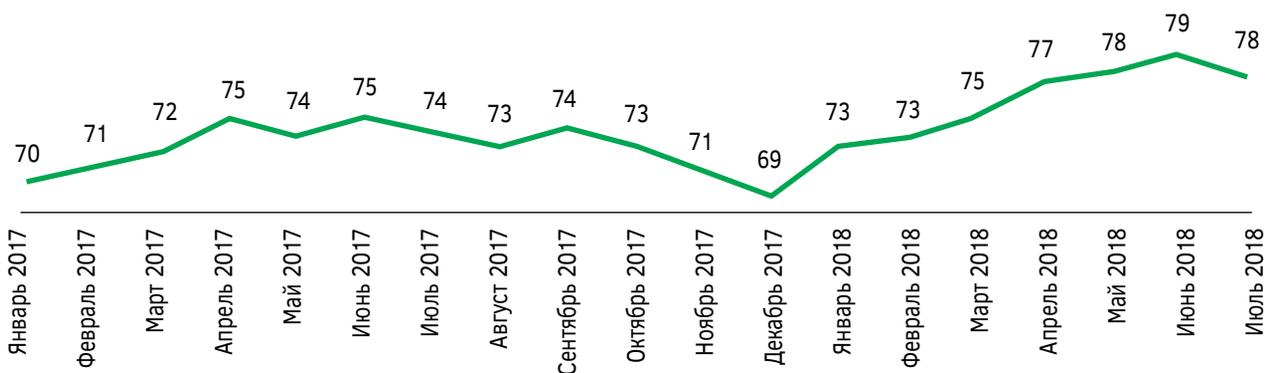


Рис. 7.14. Мировой коэффициент загрузки производственных мощностей (%), 2017–2018 гг.)

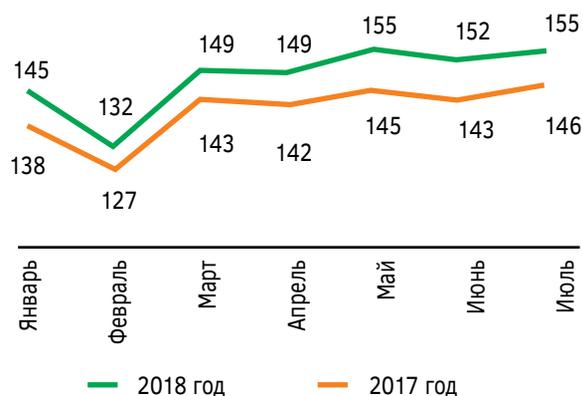


Рис. 7.15. Динамика производства стали, помесечно (млн т)



Рис. 7.16. Производство стали по регионам (% , 2017 г.)

Северная Америка

В марте 2017 г. правительство США ввело 25% пошлину на весь импорт стали. Канада, Мексика, ЕС, Южная Корея, Австралия, Аргентина и Бразилия, которые составляют более половины общего объема импорта стали в США, получили временные исключения, которые истекли 1 июня, а это означает, что поставки из этих стран уже пострадали от введения пошлин. Мексика (с 1 июня) и Канада (с 1 июля) ответили вводом собственных пошлин. Эти страны также расширили сферу их применения, включив в них не только стальную продукцию. В краткосрочном периоде действие тарифов создаст огромную неопределенность в цепочке поставок. Однако базовый сценарий экспертов из EIU не предусматривает действие пошлин для этих стран в длительном периоде. После введения пошлин производство стали в США начало увеличиваться. В марте 2018 г. US Steel объявила о перезапуске одной из доменных печей Granite City в июне, а второй доменной печи — в октябре. В июле Liberty Georgetown возобновила свое производство на проволочном заводе мощностью 700 тыс. т/год. В это же время JSW Steel приобрела Асего Junction и планирует возобновить работу электрической дуговой печи мощностью 1,6 млн т/год осенью 2018 г. Другие производители также, вероятно, увеличат загрузку производственных мощностей, поскольку в США растут цены на сталь и рентабельность металлургических компаний. Однако в 2018 г. эффект от введения пошлин на сталь в основном будет иметь только ограниченное влияние в виде сокращения бездействующих мощностей, составляющих около 5% от общего объема производства в США. Учитывая уровень инвестиций, который необходим для ввода в действие новых заводов, и средний период реализации в три-четыре года, маловероятно, что новые мощности начнут работать до 2022 г. Таким образом, цены на сталь в США останутся как минимум на 25% выше мирового уровня.

Европейский союз (ЕС)

19 июля 2018 г. Европейская комиссия объявила о введении тарифных квот на 26 видов стальной продукции для защиты внутреннего рынка от дешевого импорта в качестве мер защиты после повышения США пошлин на сталь и алюминий. Планируется, что защитная мера будет действовать на протяжении 200 дней. Пошлины в размере 25% будут вводиться лишь после того, как импорт превысит средний показатель за последние три года. Таким образом, это не резкое ужесточение баланса спроса и предложения в Европе, годовая квота для большинства продуктов соответствует 10% от объема импорта за 2017 г.

Тарифные квоты могут быть продлены после первоначального 200-дневного периода. Это продление, вероятно, принесет пользу европейским заводам, поскольку любое увеличение спроса благоприятно, тогда как ужесточение тарифов приведет к еще большему росту цен. Эксперты из EIU считают, что тарифные квоты будут продлены в текущем виде, и в соответствии с этим они прогнозируют рост производства стали на 3,2% в 2018 г. по сравнению с 3,9% в 2017 г.

Экономический рост ЕС остается стабильным, а ограничения на импорт позволят европейским заводам получить долю на рынке. Единственным недостатком может быть сокращение спроса из Алжира на арматуру. В целях защиты своей сталелитейной промышленности Алжир будет стремиться препятствовать импорту из ЕС в 2018 г. Существует несколько альтернативных рынков для арматурных заводов ЕС, но производство в этом секторе может упасть, особенно учитывая импортные тарифы США.

Тенденции в мировом потреблении

Мировое потребление стали в 2017 г. выросло примерно на 5,1% благодаря устойчивому мировому экономическому росту. Однако после впечатляющего начала года EIU ожидает, что во второй половине 2018 г. рост потребления будет умеренным из-за замедления промышленного роста в Китае, в частности, строительного сектора. В целом рост мирового потребления стали снизится до 2,8% в 2018 г., отражая тенденции в Китае и показывая устойчивый рост спроса на таких рынках, как ЕС и НАТОА.

В 2019 г. растущие процентные ставки, кредитные ограничения в Китае и циклическое замедление автомобильного сектора на развитых рынках будут иметь негативное влияние на мировой спрос на сталь. Несмотря на продолжающийся экономический рост в большинстве крупных экономик, потребление стали в 2019 г. будет расти медленнее и составит 1,3% в годовом исчислении.

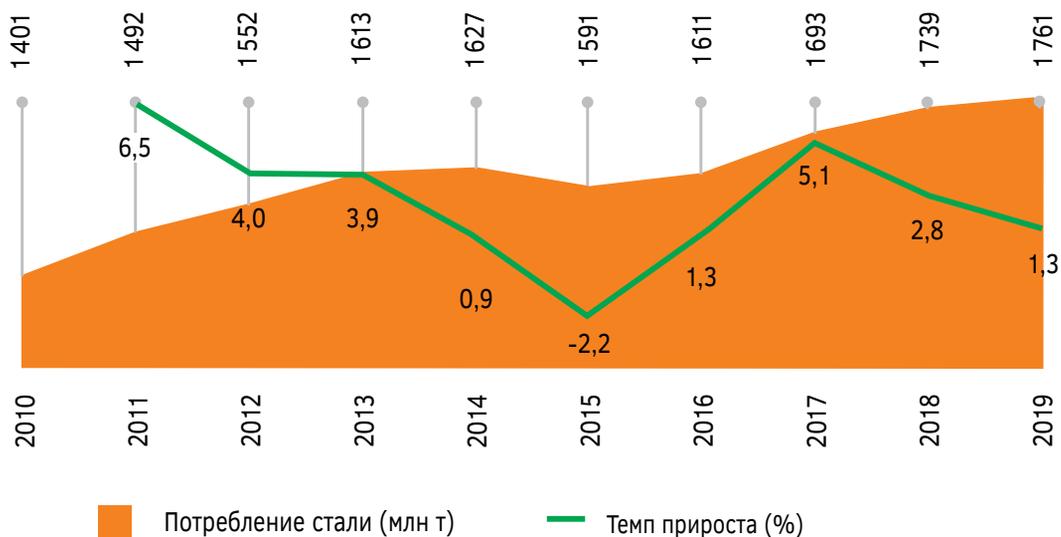


Рис. 7.17. Динамика потребления стали в мире с 2010 г.

Источник: данные World Steel Association. EIU

Северная Америка

По данным Американского института черной металлургии (AISI), на долю США приходится 75% потребления стали в Северной Америке, из которых 43% в 2017 г. относится к строительному сектору.

Администрация президента Дональда Трампа сделала амбициозные обещания инвестировать значительные средства в инфраструктуру, которая будет поддерживать потребление стали в США. Однако эти государственные расходы вряд ли будут осуществлены, учитывая одобренный в декабре 2017 г. законопроект о налоговой реформе, который сократит бюджетные поступления на 1,5 трлн долл. США в течение следующего десятилетия. Спрос на сталь на автомобильных рынках (на долю сектора приходится 27% спроса на сталь в США) также находится под угрозой из-за замены алюминия и разработки высокопрочных сплавов. Кроме того, создают угрозу долгосрочному спросу на сталь электромобили, поскольку технологические достижения и более длительное пользование электромобилями снижают спрос на их замену.

После того как правительство США ввело в середине 2018 г. 25%-ный тариф на импортную сталь, сталепотребляющие компании США, вероятно, будут платить как минимум на 25% больше за закупку стали, чем их конкуренты, поскольку они продолжают рассчитывать на импорт (эксперты не ожидают того, что американские сталелитейные компании смогут быстро наращивать мощности для удовлетворения внутренних потребностей в стали, будь то по объему или ассортименту продуктов).

EIU прогнозирует, что в 2018 г. потребление стали в Северной Америке вырастет на 4% из-за недавней волатильности цен и рыночной обеспокоенности, связанной с тем, что торговые споры могут ускорить дальнейшее накопление запасов. Росту потребления в 2018 г. также будут способствовать такие основополагающие факторы, как бурно развивающийся энергетический сектор, более высокие капиталовложения (отчасти из-за снижения налогов США) и высокий уровень потребительских расходов.

Однако к 2019 г. дальнейшее ужесточение денежно-кредитной политики и высокие цены на металлы снизят активность в секторе автомобилестроения и жилищного строительства. К тому же более высокие цены на сталь снижают спрос США в обрабатывающих отраслях промышленности, которые, возможно, перейдут на использование неамериканской стали и затем будут экспортировать готовую продукцию в США. В результате EIU прогнозирует, что потребление стали в Северной Америке сократится на 1%.

Азия

В Азии (за исключением Китая) потребление стали в 2017 г. увеличилось на 1,5%. В целом на долю небольших, но быстрорастущих стран Юго-Восточной Азии, таких как Вьетнам, Индонезия, Таиланд и Филиппины, приходится 25% от общего объема спроса Азии, еще 20% — на Индию. При этом в 2017 г. рост промышленного производства в Индии упал ниже ожидаемого уровня, что препятствовало более быстрому росту регионального спроса.

Тем не менее рост промышленного производства более чем на 7% в I квартале 2018 г. является значимой предпосылкой для роста спроса. Ожидается, что в 2018 г. рост потребления в регионе составит 3% при поддержке программы стимулирования в Южной Корее, которая частично компенсирует невысокий спрос в Японии.

К 2019 г. рост процентных ставок на развитых рынках, скорее всего, повлияет на экспортно ориентированные страны Юго-Восточной Азии, в связи с этим ожидаемый рост потребления стали в 2019 г. составит 1,5%.

Европейский союз (ЕС)

Расходы на производство и инфраструктуру будут поддерживать спрос на сталь в ЕС. Несмотря на то что Европейский центральный банк (ЕЦБ) завершит свою программу стимулирующей монетарной политики к концу 2018 г., экономика еврозоны останется достаточно устойчивой, чтобы обеспечить рост потребления стали на 2,9% в этом году. Также способствовать повышению спроса на сталь будет развитый автомобильный сектор, на который

приходится почти 20% регионального потребления. Регистрация новых автомобилей выросла на 3,4% в 2017 г., а снижение уровня безработицы привело к росту спроса в потребительском секторе, в том числе на бытовую технику. Тем не менее темпы роста регистрации новых автомобилей замедлились в первой половине 2018 г. до 2,9%. По прогнозам EIU, автомобильный рынок ЕС достигнет максимума в этом году.

В 2019 г. ужесточение фискальной и денежно-кредитной политики, скорее всего, повлияет на потребительские расходы и инвестиции, что приведет к замедлению роста спроса на сталь до 1,5%.



Рис. 7.18. Потребление стали по регионам (% , 2017 г.)

Источник: данные WorldSteelAssociation. EIU

ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ

Черная металлургия, являясь одной из базовых отраслей, вносит существенный вклад в экономику России. Успехи в развитии отрасли были обусловлены общей политической стабильностью, проведенными структурными и институциональными реформами.

В черной металлургии сформировалось десять крупных вертикально и горизонтально интегрированных холдингов, объединяющих предприятия по всей технологической цепочке производства от добычи угля и руды и их переработки до инфраструктурных подразделений, ломопереработку, энергетику, порты и ж/д транспорт, что позволяет уменьшить риски как на внутреннем, так и на внешнем рынках, оптимизировать инвестиционную политику и обеспечивать собственную сырьевую безопасность.

Суммарно на долю холдингов приходится порядка 90% производимого в России проката черных металлов. Компании активно развивают собственные сервисные службы по металлообработке и торговле готовой металлопродукцией в различных регионах страны и мира, а также осуществляют строительство электросталеплавильных заводов в регионах России в целях приближения к потребителю и повышения конкурентоспособности за счет снижения транспортных расходов. В связи с вводом новых мощностей принципиальных изменений в структуре отрасли не ожидается: более 80% производства будет приходиться на крупные вертикально интегрированные компании.

Действия, предпринятые Правительством Российской Федерации, способствовали защите внутреннего рынка, проведению модернизации (за счет отмены импортных пошлин на основные виды высокотехнологичного оборудования), уменьшению количества ограничений, действующих на внешних рынках в отношении российской металлопродукции.

Основными конкурентными преимуществами отрасли сегодня являются: собственная развитая железорудная и топливно-энергетическая база; современные мощности по выплавке чугуна, стали и производству металлопродукции; созданные вертикально-интегрированные структуры, конкурентоспособные на внешних рынках. При этом действовавший ранее такой фактор конкурентоспособности, как относительно низкие (по сравнению с внешними конкурентами) затраты на производство (природный газ, электроэнергия, тарифы на перевозку железнодорожным транспортом, заработная плата) при сопоставимом качестве продукции и технологическом уровне сегодня фактически исчерпан.

Практически не решенными сегодня остаются вопросы внедрения новых ресурсо- и энергоэффективных технологий производства; а также вопросы организации производства новых перспективных сталей и сплавов, необходимых для обеспечения спроса высокотехнологичных секторов экономики России.

Основными тенденциями развития черной металлургии являются:

- замедление темпов роста объемов производства и потребления металлопродукции;
- увеличение доли продукции, поставляемой на внутренний рынок;
- увеличение поставок на экспорт продукции с увеличением глубины переработки;
- рост импортозамещения;
- повышение требований к служебным характеристикам продукции, совершенствование ее сортамента и конкурентоспособности;
- ресурсо- и энергосбережение, снижение негативного экологического воздействия на окружающую среду;
- оптимизация избыточных производственных мощностей;
- строительство мини-заводов, передельных и сервисных центров;
- внедрение новой техники и технологий.

Развитие черной металлургии в перспективе будет определяться ростом экономики страны и соответствующим ростом внутреннего потребления черных металлов.

Основным направлением промышленной политики государства должна быть разработка экономических условий по стимулированию инвестиционной деятельности как в металлургии, так и, особенно, в отраслях, потребляющих черные металлы, для увеличения спроса на них, а также по совершенствованию горнометаллургического производства в направлении снижения расхода материальных и энергетических ресурсов, повышения производительности труда и решения проблем моногородов.

Сценарий консервативного развития экономики характеризуется невозможностью реализации новых долгосрочных масштабных проектов и программ, снижением технологической конкурентоспособности обрабатывающих производств, стагнацией в развитии топливно-энергетической отрасли. Рост внутреннего спроса на металлопродукцию по этому варианту будет происходить, в основном, за счет развития строительной отрасли, что вызовет, в свою очередь, сохранение в структуре производства преимущественно сортового проката. Прирост мощностей в металлургической промышленности будет происходить в основном за счет реконструкции и модернизации действующих объектов.

Сценарий умеренно оптимистичного развития опирается на наиболее полное использование конкурентных преимуществ России в энергетическом секторе, устойчивое наращивание экспорта сырья и повышение глубины его переработки, модернизацию транспортной инфраструктуры страны. Реализация данного сценария позволяет сформировать новые источники роста, основанные на ускоренном развитии энерго-сырьевых отраслей — ТЭК, металлургического и химического комплексов, а также транспорта. Соответствующий импульс технологического развития получают обрабатывающие отрасли, связанные с обеспечением развития энергетики, сырьевого сектора, транспорта.

Развитие металлургии по данному сценарию будет характеризоваться ростом внутреннего спроса за счет инфраструктурного и промышленного строительства и наращивания производства, за счет строительства новых и реконструкции действующих мощностей,

и совершенствования технологии металлургического производства, однако в структуре производства и экспорта сохранится значительная доля продукции с низкой добавленной стоимостью. Объемы производства металлопродукции из черных металлов по данному варианту будут масштабнее, чем по первому варианту.

Сценарий форсированного развития, наряду с использованием конкурентных преимуществ в энерго-сырьевом секторе, предполагает прорыв в развитии высокотехнологичных производств, привлечение иностранных инвестиций, развитие машиностроения опережающими темпами. Форсированный сценарий выступает в качестве целевого для экономической политики, поскольку только он в полной мере позволяет реализовать стратегические ориентиры развития России, включая развитие Арктической зоны, регионов Дальнего Востока и Сибири.

Данный сценарий отражает использование конкурентных преимуществ российской экономики не только в традиционных секторах (энергетика, металлургия, транспорт), но и в новых наукоемких секторах и превращение инновационных факторов в основной источник экономического роста. Его реализация позволяет обеспечить выход страны на уровень социально-экономического развития, характерный для развитых постиндустриальных стран, за счет повышения конкурентоспособности экономики, ее структурной диверсификации и роста эффективности.

Реализация данного сценария развития черной металлургии характеризуется опережающим развитием внутреннего спроса на продукцию с высокой добавленной стоимостью, что, в свою очередь, будет способствовать развитию новых технологий в производстве высокотехнологичных видов продукции.

При определении спроса на металлопродукцию в перспективе учитывались прогнозные показатели ВВП, промышленного производства и инвестиций в основной капитал.

Важнейшие направления для инновационных научно-исследовательских разработок:

- строительство, автомобильная промышленность, коммунальное хозяйство;
- приборостроение, аэрокосмическая, лазерная техника, водородная энергетика;
- нефтеперерабатывающая, нефтехимическая, химическая, автомобильная, машиностроительная, судостроительная промышленность;
- изучение и освоение континентального шельфа Российской Федерации;
- оборонная промышленность;
- производство труб;
- машиностроение;
- электроника;
- нефтегазовый комплекс, энергетика и другие отрасли промышленности;
- медицина и пищевая промышленность;
- железные дороги;
- металлургическая промышленность.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Баптизманский, В. И.* Конвертерные процессы производства стали / В. И. Баптизманский, М. Я. Меджибожский, В. Б. Охотский. — Киев : Техника, 1984. — 343 с.
2. *Борнацкий, И. И.* Производство стали / И. И. Борнацкий, В. Ф. Михневич, С. А. Яргин. — М. : Металлургия, 1991. — 400 с.
3. *Вегман, Е. Ф.* Окискование руд и концентратов / Е. Ф. Вегман. — М. : Металлургия, 1984. — 151 с.
4. *Воскобойников, В. Г.* Общая металлургия / В. Г. Воскобойников, В. А. Кудрин, А. М. Якушев. — 6-е изд., перераб. и доп. — М. : Академкнига, 2005. — 768 с.
5. *Галкин, Ю. А.* Инновационные технологии очистки оборотной воды технологических агрегатов заводов черной металлургии. Новые проекты и технологии в металлургии : [сб. научных трудов]. — Екатеринбург, 2010. — 636 с.

6. *Гасик, М. И.* Марганец / М. И. Гасик. — М. : Metallurgy. 1992. — 608 с.
7. *Геердас, М.* Современный доменный процесс. Введение / М. Геердас, Р. Ченьо, И. Ф. Курунов, О. Лингарди, Д. Риккетс. — М. : Metallurgizdat, 2016. — 280 с.
8. Государственный доклад о состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации в 2014 году / Минэнерго России. — М., 2015. — 160 с. — URL: <http://minenergo.gov.ru/system/download-pdf/5197/69065> (дата обращения: 23.10.2019).
9. Государственный доклад о состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации в 2015 году / Минэнерго России. — М., 2016. — URL: <http://minenergo.gov.ru/system/download-pdf/5197/66062> (дата обращения: 23.10.2019).
10. Доменное производство : справ. : в 2 т. Т. 1 / под ред. И. П. Бардина. — М. : Metallurgizdat, 1963. — 648 с.
11. Доменное производство — XXI век : Труды Международного конгресса доменщиков, 12–16 апреля 2010 года : [сборник] / [редкол.: Л. И. Леонтьев и др.]. — М. : Кодекс, 2010. — 535 с., [12] л. цв. ил.
12. *Дюдкин, Д. А.* Производство стали : в 3 т. Т. 1 : Процессы выплавки, внепечной обработки и непрерывной разливки / Д. А. Дюдкин, В. В. Кисиленко. — М. : Теплотехник, 2008. — 528 с.
13. *Ефименко, Г. Г.* Metallurgy чугуна / Г. Г. Ефименко, А. А. Гиммельфарб, В. Е. Левченко. — Киев : Выща шк. Головное изд-во, 1988. — 351 с.
14. ИТС 26–2017. Производство чугуна, стали и ферросплавов / Росстандарт. — М. : Бюро НДТ, 2017. — 478 с.
15. *Колпаков, С. В.* Технология производства стали в современных конверторных цехах. / С. В. Колпаков, Р. В. Старов, В. В. Смоктий ; под ред. С. В. Колпакова. — М. : Машиностроение, 1991. — 464 с.
16. *Кондаков, В. В.* Доменная плавка на обогащенном дутье кислородом / В. В. Кондаков. — Свердловск ; М. : ОНТИ НКПТ СССР, 1935. — 126 с.
17. *Коппенберг, Г.* Кислородное дутье в шахтной печи / Г. Коппенберг, В. Венцель. — М. : Metallurgizdat, 1959. — 159 с.
18. *Кудрин, В. А.* Внепечная обработка чугуна и стали / В. А. Кудрин. — М. : Metallurgy, 1992. — 337 с.
19. *Линчевский, Б. В.* Metallurgy черных металлов / Б. В. Линчевский, А. Л. Соболевский, А. А. Кальменев. — М. : Metallurgy, 1986. — 360 с.
20. *Лисин, В. С.* Ресурсо-экологические проблемы XXI века и metallurgy / В. С. Лисин, Ю. С. Юсфин. — М. : Высш. шк., 1998. — 446 с.
21. *Лузгин, В. П.* Энергетика сталеплавильных процессов / В. П. Лузгин, К. Л. Косырев, А. Е. Семин, Д. А. Досматов // Электrometallurgy. — 2010. — № 1. — С. 17–24.
22. *Лякишев, Н. П.* Развитие технологии непрерывной разливки стали / Н. П. Лякишев, А. Г. Шалимов. — М. : ЭЛИЗ, 2002. — 208 с.
23. Metallurgy чугуна / под ред. Ю. С. Юсфина. — М. : ИКЦ «Академкнига», 2004. — 774 с.
24. Metallurgy чугуна — вызовы XXI века : VIII Междунар. конгресс доменщиков / [редкол.: А. И. Гоммельфарб и др.]. — М. : Кодекс, 2017. — 624 с.
25. *Скляр, В. О.* Инновационные и ресурсосберегающие технологии в metallurgy : учеб. пособие / В. О. Скляр. — Донецк : ДонНТУ, 2014. — 224 с.
26. *Смирнов, А. Н.* Развитие конвертерного производства стали в мире / А. Н. Смирнов // Прогрессивные технологии в metallurgy стали: XXI век : тр. междунар. науч.-технич. конф. — Донецк : ДонНТУ, 2007.
27. *Стефаненко, В. Т.* Источники загрязнения атмосферы на коксохимических предприятиях / В. Т. Стефаненко. — Саарбрюккен : LAP Lambert Academic Publishing, 2016. — 115 с.
28. *Тулуевский, Ю. Н.* Инновации для дуговых сталеплавильных печей. Научные основы выбора : моногр. / Ю. Н. Тулуевский, И. Ю. Зинуров. — Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2010. — 347 с.
29. Чугун : справ. изд. / под ред. А. Д. Шермана, А. А. Жукова. — М. : Metallurgy, 1991. — 576 с.
30. *Шалимов, А. Г.* Инновационное развитие электросталеплавильного производства : моногр. / А. Г. Шалимов, А. Е. Семин, М. П. Галкин, К. Л. Косырев. — М. : Metallurgizdat, 2014. — 308 с.
31. *Шевченко, А. Ф.* Сопоставление эффективности способов десульфурации чугуна / А. Ф. Шевченко, Б. В. Двоскин, А. С. Вергун [и др.] // Сталь. — 2000. — № 8.
32. *Щербаков, В. П.* Основы доменного производства / В. П. Щербаков. — М. : Metallurgy, 1969. — 326 с.
33. *Юшина, Т. И.* Перспективы использования природного и техногенного железорудного сырья в Российской Федерации / Т. И. Юшина, И. М. Петров, Г. И. Авдеев, И. О. Крылов, В. С. Валавин, С. Г. Пак, В. Н. Дунаева // ГИАБ. — 2014. — № 12. — М. : Изд-во «Горная книга» (отдельная статья, специальный выпуск). — 56 с.
34. *Yi, S.-H.* Ironmaking in South Korea / S.-H. Yi, H.-G. Lee. — Beyond the Blast Furnace. — 2015. — Vol. 1. — P. 1491–1498.

ПРОИЗВОДСТВО ДРАГОЦЕННЫХ МЕТАЛЛОВ

Сергей Петрович Зайцев

Финансовый университет при Правительстве РФ, зам. декана,
кандидат экономических наук

Константин Эдуардович Дубровин

Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики»,
инженер

ВВЕДЕНИЕ

К драгоценным металлам относятся золото, серебро, платина и платиноиды: палладий, осмий, иридий, рутений и родий.

Драгоценные (благородные) металлы по сравнению с другими металлами имеют более высокую химическую устойчивость в различных средах, и в первую очередь в отношении образования кислородных соединений.

Несмотря на малое распространение в природе и сравнительно высокую стоимость, благородные металлы и их сплавы имеют широкое применение в современной технике и в быту. Это связано с разнообразием их физико-химических свойств, а также с некоторыми их особыми свойствами.

Теплопроводность и электропроводность серебра выше всех металлов, за ним следуют медь, золото и др. Платина обладает низкой электропроводностью.

Золото, серебро и платина — высокопластичные и ковкие металлы. Они хорошо прокатываются в тонкие листы, протягиваются в тонкую проволоку и штампуются. Золото и серебро сравнительно легкоплавкие.

Осмий, иридий, рутений, родий, палладий обладают высокой механической прочностью, твердостью (твердость первых трех близка к закаленной стали), высокой температурой плавления (тугоплавкие) и кипения.

По плотности, атомному числу, атомной массе платиновые металлы являют две триады, которые, в свою очередь, вместе с золотом и серебром образуют две подгруппы благородных металлов:

- тяжелые платиновые металлы (осмий, иридий, платина) совместно с золотом;
- легкие платиновые металлы (рутений, родий, палладий) совместно с серебром.

Для благородных металлов характерна высокая стойкость по отношению к химическим реактивам, которая, однако, проявляется по-разному.

По мере возрастания химической устойчивости благородные металлы могут быть расположены в следующем порядке:

- наименее устойчивые: серебро, палладий, осмий;
- устойчивые: платина, золото;
- весьма устойчивые: рутений, родий;
- наиболее устойчив иридий.

Золото растворяется только в царской водке (смесь азотной и соляной кислот в объемном соотношении 1 : 3) и в растворах цианидов щелочных металлов.

Серебро легко растворяется в концентрированной азотной и горячей серной кислотах, а также в растворах цианидов щелочных металлов.

По отношению к щелочам золото и серебро устойчивы. Все их химические соединения легко восстанавливаются до металла.

При воздействии кислот на металлы платиновой группы при обычных температурах никаких соединений не образуется. При повышенной температуре и в дисперсном состоянии платиновые металлы химически менее устойчивы, причем по отношению к различным реагентам ведут себя неодинаково.

Наиболее устойчивый элемент по отношению к кислороду — платина, по отношению к сере — рутений, по отношению к хлору — иридий, по отношению к фтору — родий. Наиболее легко окисляется кислородом воздуха даже при обычных температурах осмий, образуя летучее соединение OsO_4 .

Характерной особенностью всех благородных металлов при растворении является их склонность к образованию комплексных соединений.

Золото и серебро с кислородом образуют характерный для элементов их группы оксид, соответствующий формуле RX .

Соли оксида серебра:

- хлорид серебра нерастворим в воде (этим пользуются при очистке растворов сульфата цинка от хлора);
- легко образуют соединения с аммиаком и растворяются в нем;
- растворяются в:
 - а) крепкой соляной кислоте;
 - б) гипосульфите, тиомочевине ($ThiO$);
 - в) растворах цианидов щелочных металлов.

Все благородные металлы образуют амальгамы — системы, одним из компонентов которых является ртуть. Условием образования амальгам является свободная от оксидных пленок поверхность металла. Наличие оксидных пленок на поверхности неблагородных металлов объясняет невозможность образования ртутью с ними амальгам.

Особенности образования амальгам благородных металлов:

- ртуть образует в этих металлах твердые растворы, причем граница растворимости в платине выше, чем в золоте, и ниже, чем в серебре;
- растворимость этих металлов в ртути весьма мала, при этом растворимость платины ниже, чем серебра и золота;
- во всех системах компоненты образуют интерметаллические соединения, часть которых образует со своими компонентами фазы;
- во всех указанных системах соединения компонентов разлагаются ниже температуры плавления этих соединений;
- все соединения в этих трех системах (золото — ртуть, серебро — ртуть, платина — ртуть) имеют весьма малый термический эффект.

Таким образом, в указанных системах образуются растворы (твердые и жидкие — жидкая ртуть) и интерметаллические соединения.

Производство драгоценных металлов определяется как извлечение драгоценных металлов из добытых комплексных руд, концентратов и других полупродуктов, содержащих драгоценные металлы, а также из лома и отходов, содержащих драгоценные металлы.

Аффинаж драгоценных металлов — это процесс очистки извлеченных драгоценных металлов от примесей и сопутствующих компонентов, доведение драгоценных металлов до высокого качества.

Наряду с первичным сырьем, перерабатываются также различные виды вторичного сырья: отработанные катализаторы, электронный лом, отходы фото- и кинопромышленности, бракованные изделия, а также техногенное сырье (шлак, кек, пыль). Их доля в общем объеме перерабатываемого сырья неуклонно возрастает.

Аффинаж драгоценных металлов в Российской Федерации осуществляют десять организаций. Их географическое расположение представлено на рис. 8.1, а общие сведения — в табл. 8.1.

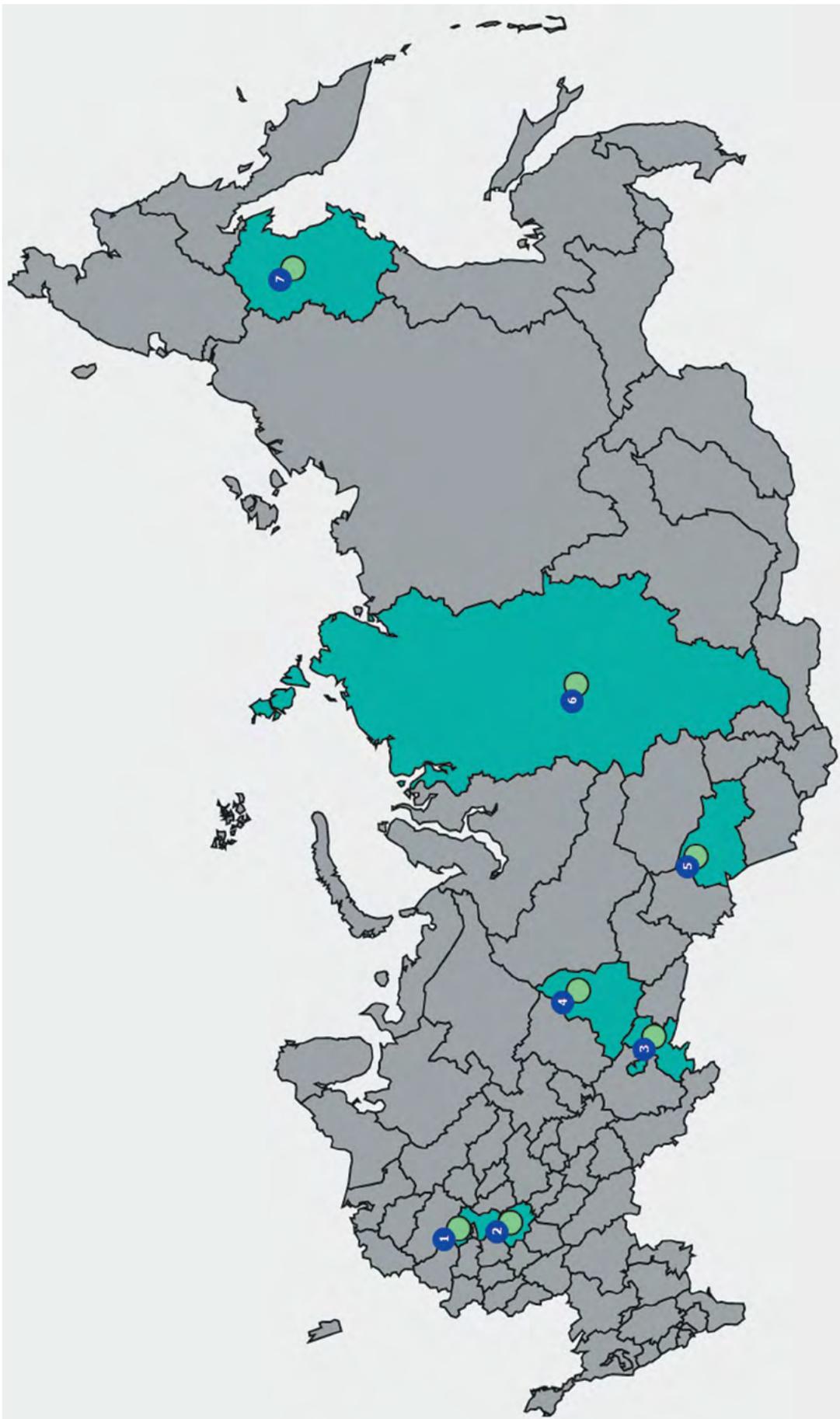


Рис. 8.1. Карта-схема размещения аффинажных предприятий Российской Федерации

Таблица 8.1. Общие сведения о предприятиях России, производящих драгоценные металлы

№ на карте	Регион	Предприятие
1	г. Москва	ФГУП «Московский завод по обработке специальных сплавов»
	Московская область	АО «Щелковский завод вторичных драгоценных металлов»
2	Рязанская область	АО «Приокский завод цветных металлов»
3	Челябинская область	ЗАО «Кыштымский медеэлектролитный завод»
4	Свердловская область	АО «Екатеринбургский завод по обработке цветных металлов»
		АО «Уралэлектромедь»
	г. Екатеринбург	ЗАО «Уральские инновационные технологии»
5	г. Новосибирск	АО «Новосибирский аффинажный завод»
6	г. Красноярск	ОАО «Красноярский завод цветных металлов имени В. Н. Гулидова»
	Красноярский край	ПАО ГМК «Норильский никель»
7	Магаданская область	ОАО «Колымский аффинажный завод»*

* Колымский аффинажный завод на данный момент есть в перечне предприятий, имеющих право осуществлять аффинаж драгоценных металлов (согласно постановлению Правительства Российской Федерации от 24 октября 2015 г. № 1136), но в настоящее время производство остановлено.

ИСТОРИЯ ЗАРОЖДЕНИЯ И ЦИКЛЫ РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВА ДРАГОЦЕННЫХ МЕТАЛЛОВ

Золото и серебро

Золото и серебро, наряду с медью, были первыми металлами, использовавшимися человеком. Этому способствовало наличие медных, золотых и серебряных самородков в природе. Сначала для производства бытовых предметов, ювелирных украшений и первых монет использовалось неочищенное золото и природный сплав золота и серебра электрон (электрум). Невозможно точно определить время начала очистки золота от примесей, но в древних египетских текстах XX династии (1200–1090 гг. до н. э.) содержатся сведения о двукратной и трехкратной его очистке, а в источниках 1090–945 гг. до н. э. упоминается высокопробное золото.

Во II в. до н. э. в Древнем Египте процесс рафинирования золота заключался в нагревании золота в горшках из глины и костяной золы в присутствии свинца, олова, соли и ячменных отрубей. В античном мире были известны методы получения серебра из черного свинца, очистка золота и серебра купелированием, извлечение золота из руд амальгамацией, огневое золочение и серебрение.

Алхимия появилась в Египте на рубеже II и III вв. н. э., период алхимии длился более тысячи лет. В этот период были разработаны способы получения серной, азотной, соляной кислот и царской водки, щелочей, изучено взаимодействие кислот с металлами, исследовались процессы, проходящие в растворах, совершенствовалась лабораторная и пирометаллургическая аппаратура.

В начале XV в. азотную кислоту стали использовать для разделения золота и серебра (соотношение золота к серебру составляет 1 : 3) в достаточно крупных масштабах, этот метод

был назван кватрированием. Этот метод применялся и для определения пробы золота. Отмечалась возможность выделения серебра из раствора медной проволокой, а медь — железом.

В XVII в. Иоганн Рудольф Глаубер разработал способ получения чистых и концентрированных азотной и соляной кислот.

На протяжении двух веков, с начала XVIII в., все операции по разделению золота и серебра, а также их очистке, в России были сосредоточены на Московском (до 1752 г. — в части разделения золота и серебра, 1763 г. — рафинирования золота, 1776 г. — серебра) и Санкт-Петербургском (с 1748 г.) монетных дворах.

Начало разделению золота и серебра было положено минцмейстером Иваном Мокеевым в 1718 г., сумевшим успешно выделить золото, содержащееся в количестве около 1%, в нерчинском золотистом серебре мокрым способом с помощью крепкой водки (азотной кислоты — HNO_3). Первоначально исходный сплав очищали от примесей (медь, олово, свинец, висмут и др.) купелированием со свинцом. Разделение основывалось на избирательном растворении серебра и немногих оставшихся в сплаве примесей азотной кислотой. Полученное золото после сплавления с бурой в качестве флюса выходило 94–952/3-й пробы. Серебро из раствора осаждали медью или железом и после промывки сплавляли в слитки 94–95-й пробы.

Золото с небольшим содержанием серебра очищали через золотую крепкую водку или акварегис (смесь азотной и соляной кислот). Золотой порошок, гранулированный или тонко раскованный и разрезанный на мелкие кусочки сплав, растворяется в царской водке. Золото и примеси при растворении переходят в раствор, а серебро остается в осадке в виде хлорида серебра. После полного растворения металла раствор упаривают до консистенции сиропа, добавляют соляную кислоту для удаления остатков азотной кислоты, охлаждают и многократно разбавляют для полного осаждения AgCl . После фильтрования раствор поступает на осаждение золота. В качестве лучшего восстановителя настоятельно рекомендовалось использовать купорос или меркуриальный раствор (нитрат ртути (I) — $\text{Hg}_2(\text{NO}_3)_2$). Хлорид серебра восстанавливают до металла железом, цинком в сернокислом растворе или сплавляют с содой. Золото с большим содержанием серебра, самородки и шлиховое золото очищали через антимонию (сульфид сурьмы — Sb_2S_3).

Для обработки шлака и выделения из него серебра и золота готовили специальный флюс (винный камень, селитра, гласгал, железные опилки, соль). В XVIII в. это был основной способ рафинирования сплавов с большим содержанием золота. Из золота, очищенного через антимонию, были отчеканены червонцы 1712 г., червонцы 1752, 1753 г., проводилось выделение серебра, содержащегося в лигатуре двухрублевых червонных 75-й пробы прежнего чекана с 1756 г. Повышение пробы сплава цементацией отличается от предыдущего способа тем, что обрабатываемый металл не сплавляется, а нагревается в герметично закрытом горшке в специально приготовленном составе, вытягивающем в себя примеси и часть золота.

В 40-х гг. XVIII в. на смену мокрому способу пришел сухой способ («метод Шлаттера») разделения серебра и золота. Данный метод быстро показал преимущество в скорости и стоимости процесса. Уже в 1752 г. все операции по разделению золота и серебра были прекращены в Москве «за великим убытком» и сосредоточены в Санкт-Петербурге. Впоследствии стали применять комбинированный метод, который сочетал в себе мокрый и сухой методы. Гранулированное золотистое серебро смешивали и нагревали с серой без доступа воздуха для перевода серебра в сульфид Ag_2S . Золото выделяли с помощью азотной кислоты, а серебро из расплава его сульфида восстанавливали эквивалентным количеством чистого железа и очищали на гнездах.

В 1819 г. после опытных работ растворение металла азотной кислотой стали проводить не в стеклянных колбах, а в деревянных емкостях, что позволило увеличить разовую загрузку, устранить пирометаллургические операции, а также были зафиксированы меньшие потери металлов. Главный недостаток холодного растворения: черновое золото было

загрязнено, кроме обычной серебряной засады, частицами не полностью растворившегося золотистого серебра и примесями, ранее удаляемыми на гнездах. После долгих экспериментов был определен лучший способ: обработка черного золота в горячей серной кислоте, позволивший после сплавления получить золото 952/3-й пробы. Черновое золото очищали с помощью серной кислоты.

В 1802 г. французский химик Жан-Пьер-Жозеф д'Арсе предложил способ разделения золота и серебра концентрированной серной кислотой. В 1829 г. на Санкт-Петербургском монетном дворе был введен способ д'Арсе. Для растворения квартованного золота применяли платиновые реторты, вмещающие 3½ пуда металла и 4 пуда концентрированной серной кислоты. Растворение продолжалось ровно 24 часа. В 1831 г. при круглосуточной работе на имеющихся 10 платиновых ретортах месячный выход золота составлял 80 пудов.

В 1831 г. была введена гнездовая отражательная печь. Загрузка в печь составляла 24–40 пудов, тогда как в тигель — до 6 пудов. Плавка на набойке позволяла очищать металл от примесей свинца, мышьяка, сурьмы, железа и висмута. Примеси частью шлаковались с флюсами (песок, бура, селитра), частью улетучивались (As, Sb, Bi), частью всасывались в золу набойки. Гранулирование проводили, выливая расплавленный металл в воду. Разливку выполняли железными ковшами, обмазанными глиной. Растворение квартованного металла производили в чугунных кубах. Чугунные кубы вмещали от 4 до 12 пудов металла и все требуемое для его растворения количество серной кислоты. Крышки котлов были снабжены двумя отверстиями: одно для отвода газа и паров кислоты, другое — для периодического перемешивания раствора и металла железным ломом.

Отстоявшийся раствор сливали в свинцовые емкости, на 1/3 заполненные холодной водой. Для отделения частиц золота и растворения выделившихся кристаллов сернистого серебра раствор нагревали до легкого кипения, перемешивая деревянными веслами. Далее, раствор сифонами переносили в осадочную емкость, где серебро из его сернистой соли восстанавливалось медью. Для осаждения серебра использовалась чистая медь, в т. ч. полосы после вырубки монетных кружков. В 1840-х гг. продолжилась практика использования сибирских монет для восстановления серебра с попутным извлечением серебра из них. Сибирские монеты перед использованием стали плющить до толщины серебряного гривенника и скручивать в спираль для увеличения поверхности соприкосновения с раствором сернистого серебра.

Раствор медного купороса после проверки полноты осаждения серебра солью переносили в осветительные ящики для осаждения просочившихся частиц серебра, после чего он поступал на кристаллизацию. Серебро после тщательной промывки на фильтре, протирки через медное решето и сушки в печи сплавлялось в тигле с флюсами. Расплавленное серебро выливали в чугунные изложницы. Средняя проба серебра, полученного таким методом, составляла 995–998. Золото, полученное в нерастворимом остатке после разваривания серной кислотой квартованного металла, оставалось на дне кубов в виде порошка, перемешанного с кристаллами сернистого серебра и частью не растворившегося металлического серебра. Для перечистки такого золота его кипятили в очистительных чугунных кубах, заменивших платиновые реторты в 1850 г., со свежей концентрированной серной кислотой.

Лаборатория разделения золота и серебра, перестроенная в 1873–1874 гг., была оснащена самым совершенным на то время оборудованием, в том числе механическими поворотными кубами для перечистки золота, устранявшими распространение паров серной кислоты. Кислота после перечистки поступала на растворение квартованного металла. Золото промывали в глиняных чашках холодной и горячей водой, промытое золото поступало на вторичное разваривание и промывку. Для получения высокопробного золота эти операции повторяли несколько раз. Промытое золото высушивали и прокаливали в отражательных печах на глиняных поддонах, а затем плавляли в графитовых тиглях с добавлением буры, селитры, соды. Золото, очищенное этим способом, обычно достигало 996–998-й пробы, а трижды перечищенное — 999-й пробы.

В 1838 г. Томпсоном и Айкеном были проведены первые опыты рафинирования золота хлорированием. Этот способ рафинирования на Монетном дворе в Сиднее (Австралия) был разработан и внедрен Миллером в 1867 г. Применение рафинирования по способу Миллера в Австралии обуславливалось высокой ценой на привозную кислоту и дефицитом серебра для квартования. Впоследствии по способу Миллера рафинировали золото в Южной Африке, Канаде и Англии. Причины, по которым способ получил распространение, заключались в следующих преимуществах перед другими способами: простота выполнения, недорогое оборудование, не требуется серебра, кислот и других реактивов, быстрота выполнения, приемлемые потери золота. Метод основан на действии газообразного хлора, пропускаемого через расплав, на металлы. В первую очередь образуются, переходят в шлак и улетучиваются хлориды неблагородных металлов, затем — серебра и в последнюю очередь — золота и металлов платиновой группы (МПГ). Практическое выполнение процесса Миллера состоит из семи операций: расплавление золота, его хлорирование, отделение рафинированного золота от хлоридов, переплавка чистого золота, извлечение золота из хлоридов, восстановление серебра из хлорида серебра и переплавка металлического серебра.

В 1896 г. в России построен завод по извлечению золота цианированием (первый такой завод построен в Йоханнесбурге (Южная Африка) в 1890 г.). Вскоре цианистый процесс применили для извлечения серебра из руд.

В 1887–1888 гг. в Англии Дж. С. Мак-Артур и братья Р. и У. Форрест получили патенты на способы извлечения золота из руд обработкой их разбавленными щелочными цианистыми растворами и осаждения золота из этих растворов цинковой стружкой. В 1893 г. проведено осаждение золота электролизом, в 1894 г. — цинковой пылью.

В 1917 г. в Южной Африке ввели продувку хлором совместно с воздухом для быстрейшего удаления неблагородных металлов.

Первые попытки электролитического рафинирования серебра предпринял в 70-х гг. XIX в. немецкий электрохимик Северо-Германского аффинажного общества Эмиль Вольвилль, применивший горячие растворы Ag_2SO_4 в серной кислоте.

В 80-х гг. XIX в. Мебиус предложил для этой цели азотнокислые растворы нитрата серебра AgNO_3 . Такой электролит применяется и в настоящее время. В качестве анода выступает рафинируемый серебряный сплав. Содержание серебра в аноде должно быть не менее 75%, золото в количестве до 20% не мешает проведению процесса. Плотность тока выбирают в зависимости от состава и концентрации примесей. Серебро, медь, другие неблагородные металлы при электрохимическом растворении анода переходят в раствор, золото полностью, платина и палладий частично выпадают в шлак. Для сбора шлама и недопущения загрязнения катодного осадка серебра аноды помещают в чехлы. Серебро осаждается на катоде в виде кристаллов, которые периодически извлекают из ванны. Анодный шлак очищают от серебра, меди, платины, палладия и других металлов поочередной обработкой азотной кислотой, раствором хлорной извести и концентрированной соляной кислотой. Нерастворимый остаток направляют в плавку золотых анодов для электролитического рафинирования золота.

Практическое применение электролитического рафинирования золота началось после появления работ Э. Вольвилля в 1874 г. Аффинаж золота проводили в электролите, состоящем из раствора хлорного золота и соляной кислоты. Аноды отливали из очищаемого сплава, катоды — из тонко прокатанного и рифленого чистого золота. Процесс протекал при постоянном токе. При содержании серебра в сплаве свыше 5% процесс расстраивался вследствие образования плотной корки хлорида серебра на поверхности анода. Методы электролитического аффинажа серебра и золота наиболее совершенны, так как позволяют получать металлы высокой чистоты при попутном извлечении металлов платиновой группы.

В России работы по устройству новой электрической лаборатории начались с выделением на них средств в 1908 г. Медный передел приспособляли для электролитического рафинирования по способу Вольвилля. Были установлены электрическая станция, паровые котлы и подогреватели, проведены паропровод, трубопровод и водяное отопление.

С выходом положения о промысловом налоге (1902 г.) в России предприятия освобождались от уплаты горной подати и отменялось обязательное представление шлихового золота в казенные золотосплавочные лаборатории для аффинажа. Разрешалось частным лицам устройство лабораторий и вообще всякого рода заведений для сплава шлихового золота и очистки золота, серебра и платины. Однако до Первой мировой войны не было учреждено ни одного частного предприятия по очистке золота и серебра.

В августе 1921 г. Петроградский монетный двор был запущен как «Медально-аффинажный завод» и начал чеканку серебряных, а с 1923 г. — золотых монет в ходе денежной реформы 1922–1924 гг. В 1922 г. при Металфонде была образована Плавильно-аффинажная лаборатория с включением в нее уже существующей гохрановской плавильной. В лаборатории внедрялся метод очистки золота хлорированием. Полномасштабное аффинажное производство на Монетном дворе в 1921–1924 гг. не возобновлялось. На оставшемся после эвакуации оборудовании проводили операции по снятию позолоты с серебряных изделий и выделение драгоценных металлов из соров. В 1925–1926 гг. на Ленинградском монетном дворе производилось рафинирование золота электролизом. Свидетельства об аффинажных операциях на Ленинградском монетном дворе после 1926 г. обнаружить не удалось. 12 января 1926 г. на базе Плавильно-аффинажной лаборатории был образован «Аффинажный завод НКФ СССР». В 1936 г. основным способом аффинажа золота стал электролиз в солянокислых ваннах, хлорирование расплава осталось только в качестве вспомогательного процесса. В 1991 г. предприятие получило название «Новосибирский аффинажный завод». С распадом СССР не удалось сконцентрировать аффинаж всего добываемого на территории СССР золота и серебра в одном месте.

Характеристика технологических циклов развития производства золота и серебра приведена в табл. 8.2.

Таблица 8.2. Основные этапы технологических циклов развития производства золота и серебра

Период, годы	Цикл	Научно-технический этап	Технико-экономический этап	Экономическо-социальный этап	Социально-регуляторный этап
До 1718	Первый (зарождение технологий рафинирования золота и серебра)	Очистка золота и серебра купелированием. Применение огневого золочения и серебрения	Разработка и совершенствование способов взаимодействия кислот с металлами	Высокий спрос на золото и серебро	Высокая трудоемкость
1718–1802	Второй (изобретение мокрого и сухого метода)	Разделение золота и серебра с помощью азотной кислоты (крепкой водки)	Совершенствование метода разделения золота и серебра	Рост потребления золота и серебра	Малая производительность
1802–1867	Третий (изобретение способа Д'Арсе)	Разделение золота и серебра с помощью серной кислоты	Более высокая чистота металла. Совершенствование метода разделения золота и серебра	Увеличение спроса на золото и серебро	Высокая трудоемкость и малая производительность
1867–1874	Четвертый (изобретение способа Миллера)	Рафинирование золота хлорированием	Попутное извлечение серебра, МПГ и меди	Рост потребления золота и серебра	Низкая трудоемкость, высокая производительность
1874 и далее	Пятый (открытие электролитического рафинирования)	Наиболее совершенный метод аффинажа	Метод с высокой степенью очистки, большой производительностью, безвреден	Рост потребления золота и серебра	Введение положения о промысловом налоге. Разрешение на устройство частных аффинажных лабораторий

Металлы платиновой группы

В самородном виде платина была известна в Древнем Египте, Абиссинии, Иберии, Южной Америке и на острове Борнео. Были найдены изделия, состоящие из природного сплава платины с металлами платиновой группы, железом, следами золота и серебра. По-видимому, был известен способ пайки платины золотом. Артефакты из очищенной платины неизвестны.

Использование платины осложнялось трудностью ее расплавления ($t_{\text{пл Pt}} = 1773,5^\circ\text{C}$) и отсутствием методов очистки ее от примесей и получения ковкого металла. Впервые платину начали аффинировать в 70-х гг. XVIII в.

М. де Лиль в 1773–1774 гг. получил ковкую форму платины. А. Л. Лавуазье в 1882 г. расплавил очень маленькое количество (0,3–0,4 г) платины в струе кислорода, направленной на кусок древесного угля.

В конце XVIII в. платину начали использовать для изготовления тиглей, посуды и ювелирных украшений.

Ковкую платину получали разными методами. Француз Пьер-Франсуа Шабано, работавший в Испании, получал ковкую платину прессованием металлического осадка, полученного прокаливанием хлорплатината аммония — $(\text{NH}_4)_2[\text{PtCl}_6]$. В 1783 г. ему был выдан патент на способ получения ковкой платины.

В первой четверти XIX в. к наиболее важным научно-техническим проблемам, имевшим большое практическое значение, относилось создание эффективной технологии переработки платины. Ученые многих стран вели длительные поиски методов получения чистой и ковкой платины, пригодной для изготовления изделий. При этом пытались применять различные способы.

В 1775 г. парижский ювелир Жанетти предложил сплавлять платину в муфельных печах с мышьяком и поташом, но это был сложный и небезопасный процесс (при высокой температуре выделялся сильно ядовитый мышьяк). Жанетти очищал шлиховую платину от железа сплавлением трех частей платины с шестью частями белого мышьяка и двумя частями поташа (K_2CO_3). Полученный слиток перекалывали в чистый тигель и заново расплавляли, затем процесс переплавки повторяли. Очищенный от железа сплав помещали в тигель с плоским дном, добавляли еще одну часть мышьяка и 1/3 поташа и расплавляли самым сильным жаром. После остывания плоские слитки имели массу на 1/2 больше исходной сырой платины. Удаление мышьяка проводили в муфельных печах при равномерном нагреве пластин в течение 6 часов и последующем закаливании в масле. Последнюю операцию повторяли до тех пор, пока были заметны улетучивающиеся пары мышьяка. Когда пары переставали быть видимыми, давали самый сильный жар, какой возможно. После очистки в азотной кислоте и промывки в воде платиновые пластины были готовы к проковке.

Граф Мусин-Пушкин примерно в 1797 г. предложил способ получения ковкой платины из ее механической смеси со ртутью. Платиновую губку Мусин-Пушкин получал обычным способом — прокаливанием хлорплатината аммония. Губку промывали в воде и кипятили в разбавленной соляной кислоте для удаления остатков железа. Смесь платины со ртутью прессовали в деревянном цилиндре, при этом удаляли излишек ртути. Твердую квазиамальгаму умеренно нагревали в тигле в течение 2–3 часов для удаления ртути, а затем доводили до белого каления. Данный метод широко не применялся, но обработка платиновой губки кипячением в разбавленной соляной кислоте для удаления железа и других примесей вошла в дальнейшую практику.

Уильям Хайд Волластон в 1803 г. выделил в чистом виде платину и открыл палладий, а в 1804 г. — родий. В 1803–1804 гг. Смитсон Теннант, старший партнер Волластона, из остатка после растворения платины выделил в порошке два новых элемента — иридий и осмий.

В 1805 г. Волластон разработал новый процесс получения платины. Процесс постоянно совершенствовался и хранился в секрете, был опубликован только в 1828 г. Растворение сырой платины Волластон вел в разбавленной царской водке с небольшим избытком азотной кислоты. Не допускалось полное растворение сырой платины. Этими мерами замедлялся переход иридия в раствор (иридий частично растворим в царской водке). Раствор выпаривали досуха, разбавляли водой, фильтровали, отстаивали и снова фильтровали. Осаждение платины из раствора проводили насыщенным раствором хлорида аммония. Осадок хлорплатината аммония тщательно промывали, уплотняли и осторожно нагревали в графитовом тигле, где платина восстанавливалась до металла. Губчатую платину промывали для удаления солей и перетирали. Крупные частицы измельчали деревянным пестиком, чтобы не заглаживать металл, а слишком мелкие — отмучивали водой. Полученную пульпу, состоящую из примерно одинаковых частиц металла и воды, помещали в латунный цилиндр и прессовали. Полученный агломерат осторожно нагревали до красного каления для удаления воды и увеличения сцепления металлических частиц. Затем агломерат размещали вертикально на подставке с кварцевым песком, накрывали огнеупорным сосудом и подвергали максимально возможному нагреванию в течение 20 минут. Проковку выполняли молотом при вертикальном расположении горячего агломерата на наковальне. Платина, полученная Волластоном, была далека от химически чистой, но по качеству считается лучшей из всех, что были произведены до него.

В 1826 г. выдающийся инженер П. Г. Соболевский вместе с В. В. Любарским разработал простой и надежный способ получения ковкой платины. Этому способствовал случайно остановленный опыт по сплавлению платины в угольной набойке, давший возможность наблюдать агломерацию частиц платины при нагревании. Первое время платиновую губку помещали в железную цилиндрическую изложницу и прессовали в холодном состоянии на винтовом прессе. Запрессованный диск вынимали из изложницы, нагревали до температуры белого каления (свыше 1200° С) и выдерживали при этой температуре длительное время, после чего его еще раз подвергали сжатию в горячем состоянии. Компактный диск ковали в полосу или прутки. Впоследствии второе прессование стали проводить с охлажденным диском, что значительно упростило процесс. Величина диска никак не сказывалась на свойствах платины. Ковкими и пластичными были как маленькие, так и большие кружки. Платиновую губку получали традиционным способом. Предварительно очистив от крупных частиц железа, сырую платину помещали в трубчатую реторту на песчаной бане и заливали четырехкратным количеством царской водки. Реторта герметично соединялась с улавливающими оксиды азота сосудами, частично заполненными водой. Нагревание реторты продолжалось и после окончания растворения, наблюдаемого по прекращению выделения бурого газа, для упаривания раствора и улавливания свободной кислоты. Сгущенный царсководочный раствор, не разбирая прибора, переносили сифоном в выпарительные фарфоровые чаши и в специальных печах упаривали досуха. В реторту насыпали новое количество сырой платины, выливали из уловителей раствор азотной кислоты, корректировали по предварительному расчету соляной кислотой, добавляли необходимое количество свежей царской водки и начинали новое растворение. Черный нерастворимый осадок, состоящий в основном из осмистого иридия, выгружали из реторты периодически. Выпаренный досуха раствор платины разбавляли горячей водой, остужали, фильтровали и отправляли на осаждение насыщенным раствором хлорида аммония. Осаждение проводили в два приема. В первый прием в раствор платинохлороводородной кислоты — $\text{H}_2[\text{PtCl}_6]$ — добавляли хлорид аммония в количестве меньшем, чем необходимо для полного осаждения, и получали светлый осадок желтого хлорплатината аммония — $(\text{NH}_4)_2[\text{PtCl}_6]$. Отделенный от полученного осадка раствор поступал на второе осаждение хлоридом аммония. Второй осадок имел более темный цвет, так как был загрязнен иридием и другими примесями. Губчатую платину, полученную из светлых осадков, промывали

водой, кипятили с разбавленной соляной кислотой, еще раз промывали и отправляли на приготовление ковкой формы. Губчатую платину из темных осадков растворяли в царской водке и отправляли проходить весь цикл.

Этот способ позволял делать из уральской платины изделия высокого качества. Таким образом, Соболевский заложил основы порошковой металлургии. По способу П. Г. Соболевского и В. В. Любарского аффинировали всю русскую платину для изготовления из нее монеты с 1828 по 1841 г.

Кажущаяся простота процесса аффинажа платины по способу Соболевского — Любарского, позволяющему перерабатывать большие объемы сырья, имела свои негативные моменты. Ковкая платина имеет в своем составе значительное количество примесей иридия, родия, палладия, рутения, меди, железа, никеля.

В 1841 г. исследование Клаусом химических свойств МПГ дало возможность в дальнейшем применить их в целях аффинажа. Он отметил причины возникновения основных недостатков способов Соболевского — Любарского и Деберайнера. Клаус предложил два способа получения чистой платины. Один из них вошел в дальнейшую практику аффинажа под названием «метод проф. К. К. Клауса» или «метод Клауса — Барабошкина».

В 1859 г. французские ученые А. Э. Сент-Клер Девиль и А. Дебре впервые выплавили платину в печи в кислородно-водородном пламени. Это изобретение преобразило металлургию платины, резко удешевило производство платиновых изделий и еще более повысило их качество.

С 1867 г. в России очищение платины на Монетном дворе стало необязательным для частных промышленников. Министерство финансов могло разрешать частным лицам устанавливать лаборатории и заведения по очистке платины.

В 1875 г. было основано Товарищество Тентелевского химического завода для производства серной, азотной и соляной кислот, в составе которого заработала платиновая мастерская по изготовлению платиновой посуды и оборудования.

С 1867 г. аффинаж платины в России был прекращен, и до 1914 г. всю шлиховую платину вывозили за границу, так как 90% капиталовложений в уральские платиновые предприятия принадлежали иностранным фирмам.

Решение о создании первого отечественного аффинажного производства было принято в 1914 г. Аффинажный завод акционерного общества Николае-Павдинского горного округа начал работу в Екатеринбурге в 1916 г.

В 1916 г. начали выпускать лишь губчатую платину и только в 1923 г. стали выделять спутники платины.

Екатеринбургский аффинажный завод (Свердловский завод по обработке цветных металлов) наряду с аффинажем платины, золота и серебра начал промышленное производство чистых МПГ: в 1922 г. — палладия, 1923 г. — иридия, 1925 г. — родия, 1927 г. — осмия, 1928 г. — платины «Экстра», 1930 г. — рутения. С внедрением кислородно-водородной плавки, проката иковки началось производство лабораторной посуды и термоэлектродной проволоки. В 1941 г. в состав предприятия влился эвакуированный завод «Платиноприбор», доля металлообработки в составе продукции составила 77%. В 1941–1943 гг. сотрудники завода участвовали в пуске аффинажного завода в г. Красноярске. Свердловский завод ОЦМ участвовал в программе выпуска памятных монет 1977–1980 гг. из драгоценных металлов, посвященных Играм XXII Олимпиады в Москве.

Московский завод «Платиноприбор» был основан в 1918 г. на базе мастерской фирмы «И. П. Хлебников, сыновья и Ко». В 1946 г. из состава завода был выделен Завод мельхиоровых изделий, переименованный в 1959 г. в Московский завод по обработке специальных сплавов. В этом же году Московский платиновый завод прекратил свое самостоятельное существование, став цехом Завода электротермического оборудования.

7 апреля 1939 г. было принято Постановление ЦК ВКП(б) и Совнаркома СССР о строительстве аффинажного предприятия в Красноярске. Первая продукция — платина и палладий из норильских шламов — была выдана в 1943 г. В 1950-х гг. на Красцветмете было освоено производство МПГ, золота и серебра. Основным поставщиком сырья для Красцветмета являлся «Норильский никель».

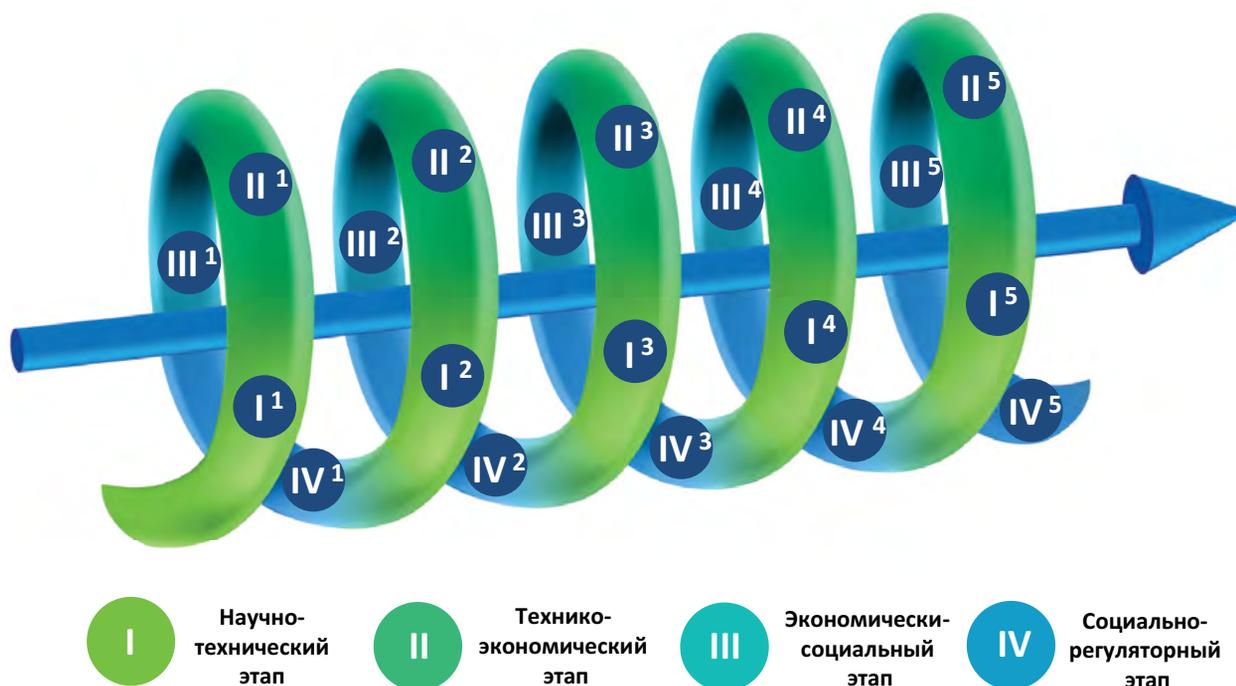
11 февраля 1974 г. вышло Постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР о строительстве Приокского завода цветных металлов.

Таблица 8.3. Основные этапы технологических циклов развития производства металлов платиновой группы

Период, годы	Цикл	Научно-технический этап	Технико-экономический этап	Экономическо-социальный этап	Социально-регуляторный этап
1773–1775	Первый (первое получение ковкой платины)	Получение платины прокаливанием хлорплатината аммония	Поиски эффективных методов получения платины	Признание ценности платины. Попытки применения в ювелирном деле	Проявление большого интереса ученых к получению платины
1775–1797	Второй (метод Жанетти)	Очистка платины мышьяком	Поиск безопасных процессов очистки	Более широкое применение платины в ювелирном деле	Высокая трудоемкость, вредность процесса. Высокое содержание примесей
1797–1805	Третий (способ Мусин-Пушкина)	Получение ковкой платины с помощью ртути	Поиск безопасных процессов очистки. Очистка платины от железа	Более широкое применение платины в народном хозяйстве	Высокая трудоемкость, вредность процесса. Высокое содержание примесей
1805–1827	Четвертый (способ Волластона)	Метод аффинажа платины в царской водке	Поиск безопасных процессов очистки	Широкий ассортимент продукции из платины	Более высокое качество металла
1827–1841	Пятый (метод Соболевского и Любарского)	Метод аффинажа платины в царской водке с хлористым аммонием	Заложены основы порошковой металлургии	Производство платиновых монет. Стоимость платины увеличилась в пять раз	Высокая производительность
1841 и далее	Шестой (открытие А. Сент-Клер и Девиля, Ж. Дербе)	Первая выплавка платины в печи кислородно-водородном пламенем	Высокая степень очистки металла от примесей	Быстрое повышение спроса и цена на платину	Высокое качество металла. Дешевизна производства

Эволюция технологий производства золота, серебра и металлов платиновой группы

Каждый цикл обусловлен определенным этапом, который дает новый толчок к развитию технологий. Последовательное прохождение всех этапов приводит к завершению цикла развития отрасли, после чего цикл повторяется (рис. 8.2, 8.3).



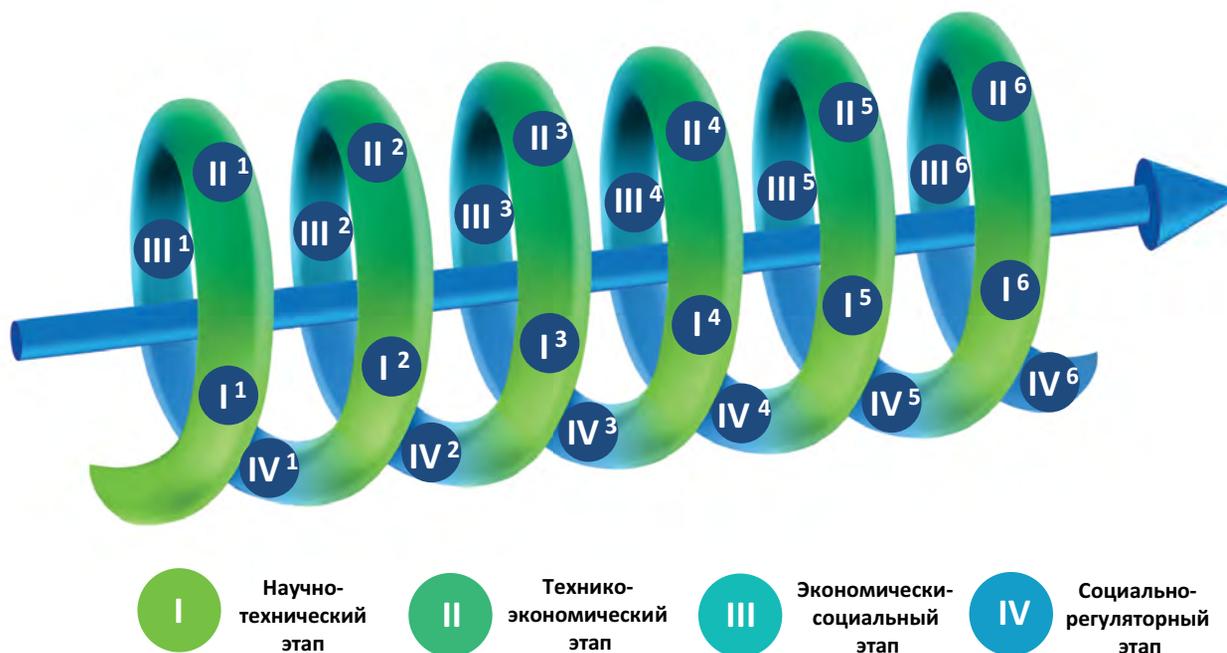
- I¹** — очистка золота и серебра купелированием, применение огневого золочения и серебрения
- II¹** — разработка и совершенствование способов взаимодействия кислот с металлами
- III¹** — высокий спрос на золото и серебро
- IV¹** — высокая трудоемкость

- I²** — разделение золота и серебра с помощью азотной кислоты (крепкой водки)
- II²** — совершенствование метода разделения золота и серебра
- III²** — рост потребления золота и серебра
- IV²** — малая производительность

- I³** — разделение золота и серебра с помощью серной кислоты
- II³** — более высокая чистота металла, совершенствование метода разделения золота и серебра
- III³** — увеличение спроса на золото и серебро
- IV³** — высокая трудоемкость и малая производительность

- I⁴** — рафинирование золота хлорированием
- II⁴** — попутное извлечение серебра, МПГ и меди
- III⁴** — рост потребления золота и серебра
- IV⁴** — низкая трудоемкость, высокая производительность
- I⁵** — наиболее совершенный метод аффинажа
- II⁵** — метод с высокой степенью очистки, большей производительностью, безвреден
- III⁵** — рост потребления золота и серебра
- IV⁵** — введение положения о промышленном налоге, разрешение на устройство частных аффинажных лабораторий

Рис. 8.2. Эволюция технологий производства золота и серебра



I¹ — получение платины прокаливанием хлорплатината аммония

II¹ — поиски эффективных методов получения платины

III¹ — признание ценности платины, попытки применения в ювелирном деле

IV¹ — появление большого интереса ученых к получению платины

I² — очистка платины мышьяком

II² — поиск безопасных процессов очистки

III² — более широкое применение платины в ювелирном деле

IV² — высокая трудоемкость, вредность процесса, высокое содержание примесей

I³ — получение ковкой платины мышьяком

II³ — поиск безопасных процессов очистки, очистка платины от железа

III³ — более широкое применение платины в народном хозяйстве

IV³ — высокая трудоемкость, вредность процесса, высокое содержание примесей

I⁴ — метод аффинажа платины в царской водке

II⁴ — поиск безопасных процессов очистки

III⁴ — широкий ассортимент продукции из платины

IV⁴ — более высокое качество металла

I⁵ — метод аффинажа платины в царской водке с хлористым аммонием

II⁵ — заложены основы порошковой металлургии

III⁵ — производство платиновых монет, стоимость платины увеличилась в пять раз

IV⁵ — высокая производительность

I⁶ — первая выплавка платины в печи кислородно-водородным пламенем

II⁶ — высокая степень очистки металла от примесей

III⁶ — быстрое повышение спроса и цен на платину

IV⁶ — высокое качество металла, дешевизна производства

Рис. 8.3. Эволюция технологий производства металлов платиновой группы

Ресурсоэффективность в рамках исторического развития отраслей промышленности рассматривается как важнейший фундаментальный концепт перехода технологического развития на новый уровень. При этом метод исследования сосредоточен на изучении реакции отрасли как целого на изменяющиеся условия, без подробного описания механизма работы и внутреннего устройства той или иной технологии, так как в рамках поставленной задачи это не является первостепенным объектом изучения.

ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА ДРАГОЦЕННЫХ МЕТАЛЛОВ

Технологии производства золота

В качестве исходного первичного сырья используют россыпное или рудное золото. В металлургии меди извлекают так называемые попутные золото и серебро. Металлы концентрируют в серебряно-золотом сплаве (сплав Доре), который получают из медеэлектролитных шламов, образующихся в процессе производства катодной меди.

Данный сплав, в зависимости от состава перерабатываемых шламов, содержит золото и серебро в разных соотношениях, и это обстоятельство необходимо учитывать при выборе способа дальнейшей переработки сплава Доре, а также оборотных продуктов аффинажного производства.

При значительном (более 15–20%) содержании серебра в сплаве Доре производится перевод серебра в раствор (как правило, азотнокислый) химическим или электрохимическим способами.

Согласно схеме, богатое по золоту сырье подвергают вскрытию; самыми распространенными способами являются растворение золота в царской водке либо гидрохлорирование (пропускание хлора через раствор 0,1–0,5 М HCl ¹. На этой головной стадии происходит более тонкое разделение золота и серебра и образование двух продуктов, перерабатываемых отдельно: золотосодержащего раствора и серебряносодержащего твердого осадка.

Золото выделяют из раствора, также применяя разные приемы. Это может быть:

- восстановление с получением порошка золота под действием таких восстановителей, как сульфит натрия, сульфат железа (II), нитрит натрия, щавелевая кислота, сахар²;
- электрохимическое выделение с получением золота на катоде;
- экстракция золота (III).

Получаемый в результате восстановления порошок золота переплавляют на аноды и подвергают электролитическому рафинированию. Именно этот процесс является завершающей операцией получения золота высокой чистоты (99,99%) на подавляющем большинстве предприятий. Рафинирование ведут в электролизерах с растворимыми золотыми анодами, в качестве электролита служат солянокислые растворы золотохлористо-водородной кислоты или раствор царской водки, катоды — титановые пластины, на которые в результате электролиза осаждается золото.

В случае если реализуется экстракционная технология, золото выделяют из солянокислого (2–5 М HCl) раствора тринбутилфосфатом, а реэкстракцию его из органической фазы осуществляют раствором восстановителя, того же сульфита натрия. Полученный порошок металлического золота по чистоте отвечает золоту высокой пробы.

Заключительная стадия технологической схемы получения слитков различной массы и гранул, отвечающих требованиям государственных стандартов.

На тех предприятиях, которые перерабатывают упорное золотосодержащее сырье (главным образом рудное золото), практически повсеместно реализуется цианидная технология, которая предполагает цианирование концентратов с переводом золота в раствор в виде прочных цианидных комплексов с последующим выделением золота из растворов двумя известными и хорошо отработанными путями:

- восстановлением цинковой пылью;
- сорбцией на активированном угле.

Оба эти процесса можно рассматривать как процессы предварительного концентрирования золота. Они не являются высокоселективными и предполагают обязательное проведение

¹ В случае растворения в царской водке появляется дополнительная операция удаления избытка азотной кислоты из раствора после вскрытия.

² Первые два реагента используются наиболее часто.

аффинажа. Именно цианидная технология таит в себе основные экологические опасности, связанные с выбросами высокотоксичных веществ в атмосферу и сбросами с отработанными растворами.

До настоящего времени не утратил своего значения для аффинажа золота хлорный метод Миллера, который был предложен еще в конце XIX в. Он получил распространение для аффинажа сплавов Доре, содержащих 88–90% золота, 7–11% серебра, а также медь, железо, цинк. Его суть заключается в том, что при пропускании газообразного хлора через расплав перерабатываемого исходного сырья все содержащиеся в нем компоненты переходят в форму хлоридов, за исключением золота. Термодинамика этого процесса такова, что золото начинает реагировать с хлором только после того, как прохлорируются примеси, включая серебро. Хлориды в виде шлака собираются на поверхности расплава, затем отделяются от него: из них получают серебро, а золото, полученное по методу Миллера, также дополнительно аффинируют электрохимическим путем до необходимой степени чистоты.

Пирометаллургические операции (коллектирующие плавки) применимы и к отдельным видам бедного вторичного сырья, однако только после его классификации и отделения от примесей органических соединений и материалов. Это относится не только к золотосодержащему сырью, но и к материалам, содержащим другие драгоценные металлы (серебро, МПГ).

Основные этапы

О п р о б о в а н и е с ы р ь я. Поступающее на аффинаж сырье поступает на стадию опробования, которое проводят двумя способами:

- проведением приемной плавки;
- головным опробованием.

П р и е м н а я п л а в к а. Цель приемной плавки — получение однородного по химическому составу сплава. При этом в результате шлакообразования происходит максимальное удаление примесей и получается необходимый для аффинажа удобной формы сплав, из которого отбирают представительную пробу.

Процесс проведения приемной плавки включает:

- приготовление шихты и плавку;
- отбор огненно-жидкой пробы по окончании плавки;
- розлив металла в слитковые изложницы;
- маркировку слитков;
- взвешивание и затаривание шлаков.

В процессе приемной плавки получают:

- слитки лигатурных сплавов;
- пробные слитки;
- слитки-оплавки;
- третичные шлаки;
- отходящие газы;
- лабораторные и контрольные пробы.

Г о л о в н о е о п р о б о в а н и е. Операцию головного опробования проводят с сыпучими материалами. В результате ее проведения достигается получение однородного по химическому составу сыпучего материала и подготовка представительной пробы. В процессе головного опробования путем измельчения, классификации и сокращения отобранного в требуемом процентном соотношении материала получают:

- опробованный сыпучий материал;
- лабораторные и контрольные пробы.

Лигатурная плавка. Лигатурную плавку проводят для получения сплава такого состава и формы, которые пригодны для проведения последующих операций аффинажа золота.

Сырьем для лигатурной плавки служит приемное сырье, сплавляемое с обратными полупродуктами: шлам электролиза серебра, остатки анодов электролиза золота и серебра, обратные остатки катодного золота, цементное золото после осаждения из маточных растворов, сплавы от плавки отходов. В зависимости от содержания серебра в исходном сырье и полупродуктах в расплав добавляют серебряный или медный лом либо порошок этих металлов.

Лигатурная плавка включает следующие стадии:

- расплавление металла и обратных полупродуктов;
- дозировка серебросодержащего сплава, лома или порошка;
- дозировка медного лома или порошка;
- отливка металла (в аноды или гранулы).

Расплавление металла производят в графитовых тиглях, установленных в печь индукционного типа. Перед разливом металла в анодные изложницы вставляют тонкие золотые пластины (ушки) из золота, предназначенные для подвешивания анодов на контактную штангу в электролизной ванне. Отливку расплава в аноды производят на специальных станках с комплектом наборных изложниц.

Розлив лигатурного золота в гранулы производят в специальную емкость, наполненную водой.

Растворение лигатурного золота. Растворение золотых лигатурных сплавов для проведения гидрометаллургического рафинирования и получения электролита для электролитического рафинирования выполняют либо электрохимическим способом, либо растворением в царской водке.

Электрохимическое растворение. Электрохимический способ основан на анодном растворении золотого лигатурного сплава в растворе соляной кислоты при воздействии электрического тока. Процесс проводят в электролизере с разделенным диафрагмой (ионообменной мембраной) катодным и анодным пространством, в результате чего золото на катоде не осаждается, а образует анолит — раствор золотохлористоводородной кислоты. На катоде в процессе электролиза разряжается водород. Несмотря на применение диафрагм, имеет место частичный перенос анионов золота к катоду, где происходит разряжение с образованием осадка золота (цементное золото).

В процессе растворения золотого сплава в раствор наряду с золотом переходят все растворимые в соляной кислоте примеси. Серебро в виде хлорида выпадает в шламовый осадок.

Растворение в царской водке. Способ основан на растворении лигатурного золота в царской водке, в результате чего образуется золотохлористоводородная кислота. Помимо растворения в смеси соляной и азотной кислот, возможно растворение методом гидрохлорирования.

Следует отметить, что сырьем для растворения золота и/или приготовления электролита служат:

- лигатурное золото в виде гранул;
- золотой шлам, полученный в процессе аффинажа серебра;
- катодное золото в виде обрезков ушек, лент, дендритов;
- цементное золото, полученное при доосаждении из маточных растворов и отработанных электролитов;
- высокопробное лигатурное золото в виде гранул и остатков анодов.

Электролитическое рафинирование. Электролиз золота основан на анодном растворении золотого сплава под действием постоянного электрического тока в растворе золотохлористоводородной кислоты, содержащем свободную соляную кислоту, и осаждении золота на катоде.

В результате электролиза получают следующие продукты:

- катодное золото, которое направляют на плавку в готовую продукцию или, в случае несоответствия готовой продукции химическому составу по ГОСТ 6835–2002, — в аноды для II стадии электролиза;
- остатки анодов, которые направляют на легирование в плавку анодов для I или II стадии электролиза;
- хлорид серебра, который направляют на переработку;
- отработанный электролит, который направляют на доизвлечение драгоценных металлов;
- газовую фазу, поступающую на газоочистку.

В случае несоответствия химического состава катодного золота, полученного в результате проведения I стадии электролиза по ГОСТ 6835–2002, а также в целях получения готовой продукции с гарантированной массовой долей основного металла не менее 99,99% проводят II стадию электролиза катодного металла, полученного в результате I стадии электролиза. Сырьем для приготовления электролита в этом случае служит катодное золото и дендриты I стадии электролиза, обрезки ушек, отбор в виде анодов. Процесс электролиза проводят аналогично технологическим операциям первой стадии электролиза при тех же технологических параметрах и составе электролита.

Обработка продуктов электролиза. *Катодное золото* промывают горячей водой от электролита, подвергают внешнему осмотру, при этом с поверхности механически удаляют хлористое серебро, удаляют дендриты. В целях удаления с поверхности катодного золота оставшихся примесей его обрабатывают соляной кислотой, а затем промывают водой. Промытое катодное золото сушат в сушильных шкафах, затем взвешивают, затаривают и направляют на плавку. Обрезки, дендриты сушат, взвешивают и направляют на легирование в плавку анодов для I или II стадии электролиза. Соляную кислоту после обработки катодного золота используют для приготовления электролита или при обработке полупродуктов.

Отработанный электролит направляют на осаждение золота аналогично маточным растворам гидрометаллургического аффинажа.

Анодный шлам содержит хлорид серебра, хлорид свинца, хлориды других металлов, золото в виде тонкого порошка, дендриты катодного золота, не растворившиеся части анодов. Шлам промывают водой от электролита, отделяя хлорид серебра от частиц металлического золота. Дендриты катодного золота и не растворившиеся фрагменты анодов промывают водой, сушат, взвешивают и направляют на легирование на плавку в аноды.

Хлорид серебра восстанавливают железным порошком при перемешивании в растворе соляной кислоты с концентрацией 30÷40 г/л либо нейтрализуют пульпу гидроксидом натрия и восстанавливают серебро гидразингидратом или другим восстановителем. Восстановленное серебро промывают на фильтре водой и сушат, после чего перерабатывают совместно с продуктами аффинажа серебра.

Гидрометаллургическое рафинирование. Процесс включает следующие стадии:

- растворение лигатурного золота;
- денитрация;
- фильтрация, разбавление и выдерживание (отстаивание) растворов в целях осаждения серебра с последующей тонкой фильтрацией;

- осаждение порошка золота из растворов пентаоксодисульфатомдинатрия ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) или сульфитом натрия (Na_2SO_3);
- отмывка порошка золота, сушка, плавка;
- переработка маточных растворов, содержащих золото и МПГ.

Денитрация растворов — это удаление нитрат-ионов из раствора, полученного в результате растворения лигатурного золота в царской водке. Ее проводят путем упаривания до получения влажных солей либо добавления карбамида (мочевины).

Осаждение золота. Золото из солянокислых растворов селективно выделяют действием сульфита натрия или пентаоксодисульфатомдинатрия:

Восстановление золота проводят в осадительных реакторах. Осадок золота на фильтре промывают и отфильтровывают. Промытый осадок сушат, взвешивают и направляют на плавку готовой продукции.

Продуктами проведения процесса гидрометаллургического рафинирования золота являются:

- отработанный электролит;
- маточный раствор;
- промывные воды;
- газовая фаза.

Отработанный электролит, маточные растворы и промывные воды от осаждения золота поступают на доосаждение золота в осадительный реактор.

Доосажденное золото фильтруют и без отмывки передают на растворение очередных партий золота либо сушат и передают на плавку лигатурного золота. Маточные растворы доосаждения золота направляют на очистку, а газовая фаза поступает на газоочистку.

Получение готовой продукции. Катодное золото или золотой порошок плавят и разливают в слитки или в гранулы. Гранулы используют для изготовления мерных слитков или для отгрузки потребителю. Полученная готовая продукция должна соответствовать по химическому составу, форме, массе, маркировке, качеству поверхности требованиям государственных стандартов.

Плавка слитков. Металл, предназначенный для плавки слитков, загружают в тигель, расплавляют, доводят до стабильного расплава и разливают в графитовые изложницы. Для получения гладкой и чистой поверхности слитков применяют графито-шамотовые крышки или крышки из диоксида циркония, предварительно разогретые в селитровой печи, с постоянным покрытием поверхности металла пламенем газовой горелки до окончания процесса кристаллизации. При розливе металла в слитки от каждой плавки (садки) отбирают одну огненно-жидкую пробу. Пробу отбирают между первым и вторым розливом, отливая часть расплавленного металла в изложницу специальной формы.

Сплавленные слитки зачищают и производят набивку серии и номера слитка, года выпуска, товарного знака предприятия. После получения анализа на слитки готовой продукции набивают марку, проверяют внешний вид и передают на взвешивание и упаковку.

Плавка гранул аффинированного золота. При розливе гранул аффинированного золота часть расплавленного металла, поступившего на плавку готовой продукции, разливают в специальную емкость, заполненную проточной водой, направляя струю расплавленного металла на специальный пруток (деревянный, винипластовый, полиэтиленовый). При этом отбирают отдельную огненно-жидкую пробу на гранулы, если это была отдельная плавка, либо одну огненно-жидкую пробу, взятую между розливом стандартных слитков и розливом в гранулы.

По окончании плавки гранулы затаривают в противни и сушат в сушильном шкафу. После получения результатов анализа гранулы, соответствующие требованиям, просеивают, взвешивают, затаривают и передают на взвешивание и упаковку либо на плавку мерных слитков.

Плавка мерных слитков. Исходным сырьем для отливки мерных слитков служат гранулы аффинированного золота. Для плавки мерных слитков набирают навески нужного номинала, загружают в огнеупорные тигли и устанавливают в селитровые или индукционные печи. Розлив металла ведут в предварительно обработанные и подогретые изложницы. Для получения гладкой и чистой поверхности слитков применяют пламя газовой горелки (пропан-воздух), обеспечивающее медленную и равномерную кристаллизацию.

Для выполнения анализа отбирают среднюю пробу от всех навесок, набранных в день плавки. Пробу плавят в режиме плавки слитков. Полученные слитки нумеруют и зачищают. После получения результатов анализа проверяют внешний вид мерных слитков и передают на взвешивание и упаковку.

Получение штампованных мерных слитков. Пластины, предназначенные для изготовления штампованных мерных слитков, плавят в режиме плавки мерных слитков номиналом 1000 или 500 г. Для выполнения анализа отбирают среднюю пробу от всех навесок, набранных в день плавки. Пробу плавят в режиме плавки мерных слитков, расплавленный металл выливают в специальную пробницу, зачищают, маркируют и передают для отбора лабораторной и контрольной пробы.

Полученные пластины зачищают от шлака и прокатывают на прокатном стане до толщины, соответствующей необходимому номиналу. После проката из пластин вырубают заготовки на вырубном прессе. Осматривают внешний вид каждой заготовки, зачищают, взвешивают.

Остатки вырубки, опилку после завершения работы передают на хранение. Штамповку проводят на гидравлическом прессе, используя штамп на соответствующий номинал. Перед каждым шагом штамповки поверхность пуансона и выталкивателя обезжиривают этиловым спиртом. На каждый изготовленный слиток набивают шифр и номер слитка, используя пневмогидравлический штамповочный пресс. После нумерации слитка проводят контрольное взвешивание и, при необходимости, доводят вес слитка до требуемых номиналов согласно рабочей инструкции по производству мерных слитков.

Слитки, прошедшие проверку внешнего вида, передают на взвешивание и упаковку.

Технологии производства серебра

В Российской Федерации запасы серебра в основном связаны с месторождениями комплексных полиметаллических руд, поэтому серебро добывается попутно, а получение металлического серебра связано с переработкой различных видов техногенного сырья.

Поскольку серебро по своим химическим свойствам близко золоту, для него применимы приемы избирательного выщелачивания цианидными растворами с последующим осаждением на цинковой пыли (процесс Меррил — Кроу). Образующийся цинковый цементат подвергается аффинажу.

При переработке свинцово-цинковых руд на стадии рафинирования свинца серебро накапливается в так называемой «цинковой пене». Ее перерабатывают электротермическим способом: цинк отгоняют при температуре 1250°С, а полученный серебросодержащий свинец плавят в купеляционных печах на сплав Доре.

Следует подчеркнуть, что в технологии производства серебра, когда исходное сырье содержит примеси меди, селена, теллура, нередко проводят плавки с добавлением флюсов — соды, буры, которые вводят в количестве 1,5–3% от массы загружаемого металла.

Плавка является основным источником потерь драгоценных металлов, именно поэтому так велик интерес к гидрометаллургическим технологиям.

Итак, при переработке медеэлектролитных шламов и «цинковой пены» конечной стадией является получение серебряно-золотого сплава.

Таким образом, на аффинажные заводы поступают преимущественно:

- сплав Доре;
- цинковые цементаты;
- хлоридные шлаки или иные продукты, в которых серебро присутствует в виде хлорида.

Кроме того, нельзя не указать на такие виды вторичного сырья, как электронный лом, лом серебряных изделий и т. п.

В процессах переработки серебряно-золотого сплава возможны различные варианты разделения серебра и золота: в результате растворения в азотной кислоте в раствор переходит серебро, а золото остается в твердом остатке; при растворении сплава в царской водке образуется труднорастворимый хлорид серебра, а золото растворяется. Для достижения максимальной степени разделения драгоценных металлов при выщелачивании азотной кислотой рекомендуется, чтобы содержание серебра в сплаве превышало концентрацию золота в 2–3 раза. Как правило, после растворения в азотной кислоте полученный раствор нитрата серебра после соответствующей очистки от примесей направляется на электролиз с получением катодного серебра.

Если сплав содержит около 95% серебра, 3% золота, примеси с разным количеством меди, свинца, железа, никеля, селена, он непосредственно подвергается электролитическому рафинированию. Его переплавляют в аноды, а электролитом служит водный раствор нитрата серебра с добавкой свободной азотной кислоты. Содержание примесей, особенно золота и меди, в анодах строго регламентируется.

Целесообразно рассмотреть вариант электроэкстракционной технологии аффинажа серебряно-золотого сплава. Он предусматривает получение катодного серебра, золотого шлама и концентрата платиновых металлов. Согласно этой технологии, сплав Доре растворяют в азотной кислоте в присутствии ионов аммония под давлением выделяющейся газовой фазы. При взаимодействии оксидов азота и ионов аммония происходит выделение азота и регенерация связанной кислоты. Золото, платина и частично палладий переходят в нерастворимый осадок — золотой шлам. Полученный азотнокислый раствор подвергают сорбционной очистке от платиновых металлов, а также гидролитической очистке от меди, теллура и других примесей. Очищенный раствор подвергают электроэкстракции с получением катодного серебра.

Предложено множество вариантов технологии переработки цинковых цементатов с содержанием серебра не ниже 75–80%. Известные в литературе схемы отличаются выщелачивающим агентом на первой стадии, количеством стадий выщелачивания, условиями этой операции, однако они обеспечивают получение богатых серебросодержащих концентратов, пригодных для аффинажа. Так, например, по технологии осадки выщелачивают азотной кислотой в целях перевода в раствор серебра, цинка и прочих кислото-растворимых примесей и разделения серебра и золота, которое остается в осадке. Далее полученную пульпу обрабатывают раствором каустической соды до концентрации NaOH в растворе 100–120 г/дм³, при этом в осадок выпадает серебро в виде оксида, а примеси, в частности меди, — в виде гидроксидов. Селен остается в растворе, вероятнее всего, в виде селенита натрия; цинк также переходит в раствор. Таким образом, твердой основой пульпы является преимущественно оксид серебра и золото. Ее отделяют, сушат и плавят на серебряный золотосодержащий сплав с добавками негашеной извести и силикатного стекла. Из сплава отливают аноды (98,8% серебра, 0,31% золота) для электролитического рафинирования.

Отдельно необходимо рассмотреть переработку концентрата серебра, образующегося при выделении его в виде хлорида из сульфатных растворов выщелачивания медно-нике-

левых шламов. Поскольку он содержит сумму хлоридов серебра и цветных металлов, его обрабатывают горячей водой в целях предварительного обогащения, чтобы удалить хлориды свинца, меди, избыток хлорида натрия; нерастворимый остаток промывают, сушат и плавят с содой, получая серебрясодержащий сплав, который поступает на электрохимическое рафинирование для получения кондиционного металла.

Электролитическое рафинирование — наиболее распространенный способ получения аффинированного серебра чистотой свыше 99,97% в промышленном масштабе, несмотря на высокую энергозатратность и жесткий контроль состава электролита.

Основные этапы

Технологический процесс аффинажа серебра выполняют путем электролитического рафинирования с последующей плавкой для получения готовой продукции.

При электролитическом рафинировании серебра в качестве растворимого анода используют рафинируемый серебряный сплав. Электролитом служит водный раствор нитрата серебра в азотной кислоте. Технологический процесс электролитического рафинирования серебра включает несколько стадий:

- получение анодов;
- приготовление электролита;
- электролиз;
- цементация;
- плавка для получения анодов, слитков, гранул, пластин;
- доработка растворов электролиза.

Лигатурная плавка. Лигатурную плавку проводят для получения сплава таких состава и формы, которые пригодны для выполнения процесса аффинажа серебра. Сырьем для лигатурной плавки служит приемное сырье, а также оборотные серебрясодержащие материалы.

Плавка лигатурного металла. Плавке подвергают лигатурный металл с различной массовой долей серебра и примесей: слитки приемного и оборотного серебра, промпродукты производств золота и серебра, отливки, полученные в результате плавки отходов производства. В процессе плавки промпродукты легируют на заданный состав по расчету в целях получения анодов, соответствующих по составу требованиям, предъявляемым к сплавам для основного или предварительного электролиза и доработки.

Плавку проводят в индукционных печах без добавления флюсов до состояния стабильного расплава, снимают шлак и производят розлив металла в чугунные изложницы. Анодные изложницы, а также пробную изложницу, перед розливом расплава металла и отбором огненно-жидкой пробы предварительно смазывают антипригарной смазкой.

Анод представляет собой отливку в виде пластины со специальными приливами — ушками. Размеры анодов должны соответствовать форме и размеру электролизной ванны. Розлив расплава металла выполняют в анодные изложницы с помощью разливочного графитового тигля. Полученные аноды выбивают из изложниц, зачищают от шлака, заусениц, а затем клеймят, набивая номер и серию слитка, взвешивают и направляют на электролиз.

Плавка восстановленного серебра. Восстановленное серебро, полученное в процессе аффинажа золота, плавят под слоем флюсов (кальцинированной соды с небольшим добавлением буры) и разливают в анодные или слитковые изложницы. В дальнейшем полученные слитки используют для легирования анодов.

Электролитическое рафинирование. В качестве электролита при электролизе серебра применяют водный раствор нитрата серебра, содержащий свободную азотную

кислоту. Электролит готовят путем растворения высокопробного серебра в растворе азотной кислоты. Полученный раствор нитрата серебра фильтруют, при необходимости разбавляют водой и используют в качестве рабочего электролита электролиза серебра.

В процессе растворения лигатурного серебра при приготовлении электролита получают:

- электролит;
- шлам золотой;
- газовую фазу и пары, содержащие драгоценные металлы;
- остатки анодов.

Основной электролиз. В ваннах основного электролиза проводят электролитическое рафинирование серебра в целях получения готовой продукции, соответствующей требованиям государственных стандартов.

В ванны завешивают аноды, электролитом служит раствор азотнокислого серебра. Перемешивают электролит в ванне сжатым воздухом. В процессе электролиза контролируют плотность тока, напряжение на ванне, температуру электролита, выход по току (катодный). В процессе электролиза электролит обедняется серебром и обогащается примесями, поэтому его постоянно заменяют.

В результате процесса основного электролиза получают:

- кристаллическое серебро, которое отправляют на плавку в готовую продукцию;
- остатки анодов, которые переплавляют в аноды основного электролиза;
- отработанный электролит, направляемый на ванны цементации;
- шлам золотой;
- отработанные диафрагмы;
- газовую фазу.

Полученное кристаллическое серебро счищают с катода и по мере необходимости утрамбовывают на дне электролизной ванны. Выгрузку кристаллического серебра из электролизных ванн основного электролиза производят периодически, по мере накопления кристалла в ванне (кристалл не должен соприкасаться с диафрагмами и катодами).

Предварительный электролиз. Аноды, из которых нельзя получить готовую продукцию серебра, отвечающего всем необходимым требованиям, направляют на стадию предварительного электролиза.

В процессе предварительного электролиза получают:

- кристаллическое серебро, которое направляют на плавку в аноды основного электролиза;
- остатки анодов, которые плавят в аноды предварительного электролиза;
- золотой шлам;
- отработанные диафрагмы;
- отработанный электролит, который направляют на переработку на ваннах доработки;
- газовую фазу.

Выгрузку кристаллического серебра из ванн предварительного электролиза также производят периодически.

Кристаллическое серебро промывают, сушат и направляют на легирование и плавку в аноды на соответствующую стадию электролиза или в готовую продукцию.

Остатки анодов зачищают щетками от шлама, промывают водой от электролита и шлама, легируют кристаллами, полученными в результате предыдущей стадии электролиза, и плавят в аноды для стадии, в процессе которой остатки были получены.

Анодный шлам, полученный в процессе электролиза от зачистки и замывки водой остатков анодов и диафрагм, по мере накопления направляют на переработку. Переработку

анодного шлама производят в целях удаления из шлама серебра и примесей, а также обогащения шлама по золоту.

Отработанные растворы, полученные в процессе переработки шламов, направляют на доработку в целях перевода примесей, находящихся в растворах, в нерастворимые соединения и последующего отделения нитрата серебра. Полученный при этом осадок, содержащий оксиды и основные соли МПГ, меди, висмута, свинца, теллуриды и селениды серебра, в виде пульпы помещают в реактор и обезмеживают концентрированной азотной кислотой. Обезмеженный осадок фильтруют, промывают, сушат и направляют на получение концентрата МПГ.

Изготовление готовой продукции. Кристаллическое и прочее аффинированное серебро (возврат слитков с дефектами внешнего вида, приемный металл, прокат и др.) плавят и разливают в слитки или в гранулы. Гранулы используют для изготовления мерных слитков или отгрузки потребителю.

Плавка в стандартные слитки. После установления марки металл загружают в тигель, расплавляют и разливают в изложницы. При розливе металла в слитки от каждой плавки (садки) отбирают одну огненно-жидкую пробу. Пробу отбирают, отливая часть расплавленного металла в изложницу специальной формы. Сплавленные слитки зачищают и производят набивку серии и номера слитка, года выпуска, товарного знака. После получения анализа на слитки готовой продукции набивают марку, проверяют внешний вид и передают на взвешивание и упаковку.

Плавка гранул аффинированного серебра. Для получения аффинированного серебра в виде гранул расплавленный металл разливают тонкой струей в специальную емкость (гранулятор), заполненную проточной водой, направляя струю расплавленного металла на специальный прут (деревянный, винилпластовый, полиэтиленовый). Полученные гранулы сушат при периодическом перемешивании. После получения результатов анализа гранулы просеивают через сито с размером ячеек 10 мм, взвешивают, затаривают и передают на упаковку либо на плавку мерных слитков. Для изготовления серебряного проката отливку металла производят в специальные вертикальные изложницы.

Изготовление мерных слитков. Металлом для отливки мерных слитков служат гранулы аффинированного серебра (см. предыдущий раздел). Для плавки мерных слитков набирают навески нужного номинала, загружают в огнеупорные тигли и устанавливают в селитовые или индукционные печи. Розлив металла ведут в предварительно обработанные и подогретые изложницы. Получение гладкой и чистой поверхности слитков обеспечивается за счет пламени газовой горелки (пропан-воздух), обеспечивающей газовой медленную и равномерную кристаллизацию.

Для выполнения анализа отбирают среднюю пробу от всех навесок, набранных в день плавки. Пробу плавят в режиме плавки слитков. Полученные слитки нумеруют и зачищают. После получения результатов анализа проверяют внешний вид мерных слитков и передают на взвешивание и упаковку.

Изготовление серебряных анодов и пластин. Изготовление серебряных анодов и другого проката аффинированного серебра осуществляется из специально отлитых серебряных пластин. Химический состав, геометрическая форма, толщина, маркировка и внешний вид серебряных анодов должен соответствовать заданным требованиям.

Серебряный прокат получают путем проката литых серебряных пластин на прокатном стане до необходимой толщины, разметки пластины и вырубки на гильотине (или на вырубном штампе) необходимой геометрической формы.

Технологии производства металлов платиновой группы

Технология аффинажа металлов платиновой группы относится к наиболее сложным и многооперационным, поскольку эти элементы обладают общностью химических свойств. Попутно с МПГ при переработке платиновых концентратов, получаемых из шламов медно-никелевого производства, товарными продуктами являются золото, серебро, селен, теллур, кобальт, сера).

Помимо платиновых концентратов (ПК), для получения платины используется природный концентрат, так называемая «шлиховая» платина, сырье с содержанием ~ 75% платины в виде природного сплава платины и железа (минерал ферроплатина).

К другим видам сырья для получения платины стоит отнести:

- отработанные автомобильные катализаторы;
- электронный лом, содержащий платину и другие платиновые металлы;
- катализаторные сетки, выработавшие срок службы;
- отходы стекольной промышленности, изделия электротехнической промышленности, отходы химической промышленности.

В случае палладия в качестве богатого вторичного сырья можно рассматривать технологический лом — стоматологические сплавы.

Сложность аффинажа МПГ обусловлена тем, что ПК, являющиеся основным исходным сырьем, характеризуются высоким содержанием примесей. Это обуславливает высокие затраты на аффинаж и большие объемы отходов аффинажной переработки.

Существующая технология переработки шламов направлена на извлечение платины, палладия и золота. Общее извлечение драгоценных металлов и извлечение РПМ в селективные концентраты остается низким: так, степень извлечения иридия является в настоящее время самой низкой и в случае концентрата КП1 составляет 40%.

Важно подчеркнуть, что технология получения МПГ, в первую очередь платины и палладия, чрезвычайно консервативна, в ее основе лежит идея переработки платиновой руды, сформулированная еще в XVIII в. и заключающаяся в растворении концентрата в царской водке, последующем осаждении из раствора платинохлористоводородной кислоты гексахлороплатината (IV) аммония и его прокаливании при температуре 1000°С с получением металлической платины. Из раствора после отделения платины выделяют палладий, осаждая его в виде труднорастворимой соли *транс*-дихлородиамминопалладия (II), которую также прокаливают в целях получения металлического палладия. Это только ключевые моменты технологии. Им сопутствует множество переделов, обеспечивающих селективность осаждения труднорастворимых солей платины и палладия. Сюда относится и стадия удаления избытка азотной кислоты (при растворении концентрата в царской водке), и операция «доводки» растворов перед осаждением гексахлороплатината (IV) аммония, чтобы обеспечить присутствующие в нем сопутствующие платиновые металлы в определенных степенях окисления (иридия в степени окисления (+3)), палладия в степени окисления (+2)). Необходимость последней операции вызвана тем, что разделение близких по свойствам МПГ обеспечивается тонкими различиями в термодинамических и кинетических свойствах их хлоридных комплексов.

Растворение в царской водке обеспечивает отделение платины и палладия от суммы редких платиновых металлов (РПМ) (рутений, родий, иридий), которые концентрируются в нерастворимом остатке.

Исключением является осмий, который ввиду летучести его тетраоксида отделяют отгонкой в газовую фазу на головной стадии аффинажа любого сырья, содержащего осмий. Обогащенный по осмию ПК в настоящее время пока не производится ввиду незначительной потребности в нем. В процессе обогащения шламов осмий вместе с селеном концентрируется в кеках газоочистки и в таком виде складывается.

Способ растворения исходного сырья в царской водке отличается высокой степенью извлечения платины и палладия в раствор, но имеет ряд существенных недостатков:

- высокий расход реагентов (300–400% от стехиометрии);
- бурное выделение токсичных оксидов азота;
- наличие в образующихся растворах значительного количества нитрат-ионов, что делает невозможным их дальнейшую переработку без дополнительных операций.

В настоящее время на большинстве предприятий используют вскрытие ПК в растворе соляной кислоты с использованием в качестве окислителя пропускаемого через пульпу газообразного хлора в титановых реакторах при механическом перемешивании и температуре 70–90°С. При проведении этой операции выделяющиеся при выщелачивании газы используются для регенерации растворителей, а также как самостоятельные вскрывающие реагенты. Высокие концентрации газообразного хлора способствуют переходу МПГ в составе комплексных соединений в высшие степени окисления, и они начинают «работать» как сильные окислители, ускоряя процесс растворения.

Однако способ гидрохлорирования характеризуется довольно медленной кинетикой. Так, для растворения 100 кг «сырой» платины в растворе соляной кислоты с концентрацией $300 \div 350 \text{ г/дм}^3$ при соотношении т:ж = 1:3 необходимо проводить процесс в течение 12 ÷ 16 ч. По сравнению с растворением в смеси соляной и азотной кислот гидрохлорирование обладает меньшим расходом реагентов (100–200% от стехиометрии). Отделение платины и палладия от РПМ достигается за счет подбора оптимальной концентрации кислоты, температуры и окислительно-восстановительного потенциала реакционной среды.

Как отмечалось выше, выделение платины из растворов основано на способности платины (IV) образовывать малорастворимое соединение гексахлороплатинат (IV) аммония — $(\text{NH}_4)_2[\text{PtCl}_6]$. В растворе большая часть платины должна находиться в степени окисления (+4), чтобы обеспечить высокий выход гексахлороплатината (IV) аммония (комплексная соль $(\text{NH}_4)_2[\text{PtCl}_4]$, подобно $(\text{NH}_4)_2[\text{PdCl}_4]$, хорошо растворима). При этом палладий и иридий в степени окисления +4 также образуют нерастворимые гексахлорометаллаты, изоструктурные с гексахлороплатинатом (IV) аммония. В процессе осаждения гексахлороплатината (IV) аммония хлорид аммония необходимо вводить с избытком для снижения растворимости осаждаемой соли.

Выделение палладия возможно в форме *транс*-дихлородиамминопалладия (II) $[\text{Pd}(\text{NH}_3)_2\text{Cl}_2]$. Для его осаждения в солянокислый раствор постепенно вводят гидрат аммиака. Так как его приливают постепенно, то первоначально часть палладия переходит в катионную форму тетраамминпалладий (II), а другая часть остается в виде тетрахлоропалладат (II) — иона. Выпадает соль Вокелена, которая при дальнейшем добавлении аммиака растворяется с образованием тетраамминпалладий (II) дихлорида. К полученному раствору постепенно прибавляется соляная кислота: при этом выпадает светло-желтый кристаллический осадок *транс*-дихлородиамминопалладия (II).

Восстановление выше указанных солей до металлического состояния возможно несколькими методами. Наиболее распространен способ прокаливания при температуре 800–1200°С.

Рассмотренный метод аффинажа МПГ является осадительным, а осадительные методы наиболее просты для реализации в технологической практике. Методы осаждения наиболее просты и в аппаратном оформлении.

Таким образом, в течение многих десятилетий в практике аффинажа на отечественных и зарубежных предприятиях использовались и используются до сих пор схемы, которые насчитывают десятки взаимосвязанных операций с многочисленными оборотами растворов и полупродуктов, приводящие к потерям драгоценных металлов. Чрезвычайно трудоемки операции перевода МПГ в раствор с применением царской водки, спекание с пероксидом бария нерастворимых остатков, концентрирующих сумму РПМ, сплавлением со свинцом и цинком и др.

Гораздо более высокой производительностью характеризуется экстракционная технология аффинажа МПГ.

Она предусматривает выделение золота из растворов после гидрохлорирования, экстракционную очистку от примесей неблагородных металлов (олова, сурьмы, железа), экстракцию палладия и экстракцию платины (параллельно, но по отдельности). Экстракционное извлечение иона $[\text{PtCl}_6]^{2-}$ из солянокислых растворов также, как и примесей цветных металлов, осуществляется экстрагентом ТБФ³. Экстракцию иона $[\text{PdCl}_4]^{2-}$ из солянокислых растворов проводят органическими сульфидами или нефтяными сульфоксидами. Применение метода жидкостной экстракции в сочетании с электрохимическими процессами позволяет извлекать в готовую продукцию не менее 90% платины и 80% палладия от их содержания в исходном сырье. Далее проводят промывку органической фазы и реэкстракцию. На заключительной стадии идет осаждение платины в виде гексахлороплатината (IV) аммония (см. выше) и палладия в виде *транс*-дихлородиамминопалладия (II) (см. выше).

Рафинаты, образующиеся при экстракции платины и/или палладия, объединяют и из них электрохимически осаждают на катоде концентрат МПГ.

Чистые порошки родия и иридия получают, проводя последовательно операции электрохимического выделения металлов на катоде, растворения катодного осадка, экстракционной очистки и электрохимического выделения родия, электрохимической очистки иридийсодержащего раствора от примесей других МПГ с последующим осаждением иридия в виде гексахлороиридата (IV) аммония. Экстракционная технология переработки ПК предусматривает разделение родия и иридия также экстракцией три-*n*-бутилфосфатом. При этом иридий в степени окисления (+4) переходит в экстракт, а родий в степени окисления (+3) остается в рафинате. Восстановление труднорастворимых солей РПМ в токе водорода приводит к образованию металлических порошков.

Использование экстракционных технологий аффинажа позволяет в 2–3 раза сократить объемы маточных растворов, сократить число технологических операций и примерно в 5 раз уменьшить время переработки исходного сырья.

Конечными продуктами аффинажа МПГ, независимо от выбранной технологии, являются мерные слитки (для платины и палладия) и порошки.

СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ

Современное аффинажное производство драгоценных металлов из первичного сырья характеризуется высоким уровнем применения электролиза (88% заводов) и внедрением жидкостной экстракции (12%).

Аффинаж хлорированием проще и дешевле электролитического процесса и пригоден для рафинирования золота любой чистоты, но дает недостаточно чистое золото (обычно 995–996-й пробы). Такой металл годится для использования в монетарных целях, но не удовлетворяет требованиям современной техники. К недостаткам хлорного метода аффинажа следует также отнести существенные потери серебра и платиновых металлов (если они присутствуют в исходном металле), которые остаются в очищенном золоте.

Кислотные методы аффинажа громоздки, дороги и не позволяют получать благородные металлы той степени чистоты, которая необходима для современной промышленности. Из-за этих недостатков кислотные методы в настоящее время применяются ограниченно. Иногда их используют для предварительного разделения благородных металлов перед окончательным аффинажем их электролитическим методом.

Электролитические методы аффинажа наиболее совершенны и позволяют получать металлы высокой чистоты при комплексном использовании всех ценных компонентов,

³ Принципиально возможны и другие экстрагенты.

входящих в состав рафинируемого металла. Этот метод является одним из самых выгодных, так как, совместно с низкой стоимостью процедуры, он добивается высоких результатов при соблюдении приемлемых, а в некоторых случаях благоприятных условий работы.

Если подробно рассмотреть недостатки аффинажного производства, то основными из них будут следующие: многостадийное растворение концентратов металлов, осуществляемое к тому же в периодическом режиме, в дорогостоящем оборудовании и с использованием дорогих реагентов; многократные операции осаждения чистых солей, прокаливания их и повторное растворение металлов, не удовлетворяющих потребителя по чистоте; периодичность, длительность и трудоемкость аффинажных операций; циркуляция значительных объемов оборотных растворов, что приводит к дополнительным расходам реагентов и большому объему незавершенного производства; значительная потребность в рабочей силе, так как периодические процессы используют ручной труд, а возможности автоматизации и механизации при этом незначительны; использование фарфоровых, стеклянных, кварцевых реакторов, что резко увеличивает стоимость оборудования.

Наряду с первичным сырьем, перерабатываются также различные виды вторичного сырья: отработанные катализаторы, электронный лом, отходы фото- и кинопромышленности, бракованные изделия и т. п., а также техногенное сырье: шлаки, кеки, пыли. Например, процесс получения драгоценных металлов из медеэлектролитных шламов является более энергозатратным, чем из первичного сырья.

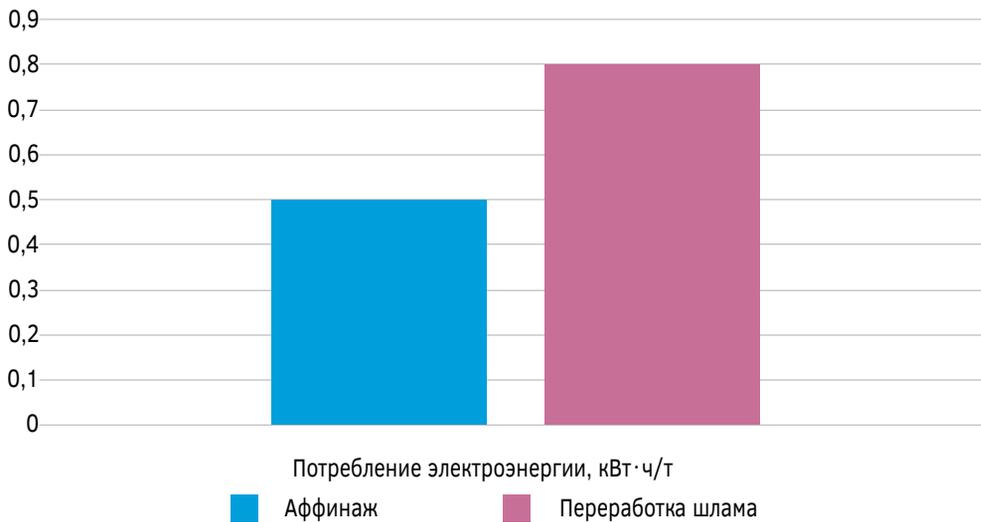


Рис. 8.4. Сравнение технологий

Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу

Пыль может возникнуть в результате проведения таких операций, как:

- смешение материала перед плавкой (расплавленного и флюсов и т. д.) в смесителе для сыпучих материалов до начала плавки;
- очистка драгоценных металлов и других металлосодержащих отливок от следов шлака до начала отбора проб или плавки;
- дробление шлака, отработанных тиглей и огнеупорных материалов в дробилке;
- смешение, дробление, просеивание сырья, содержащего драгоценные металлы, в виде порошков;
- измельчение (дробление) и хранение промежуточных продуктов, полученных при сушке и прокаливании.

Пыль и металлы принципиально могут выделяться в любых пирометаллургических процессах, таких как сжигание, обжиг, плавка и купелирование, присутствовать в неорганизованных выбросах.

Выбросы диоксида серы для собственно аффинажного производства мало характерны. Они образуются при сгорании топлива и в случае, если электролитическое рафинирование серебра осуществляется в сернокислых электролитах. В то же время они типичны при переработке шламов в процессах обжига (особенно) и выщелачивания и могут достигать около 900 мг/м³ при ПДК рабочей зоны 10 мг/м³.

Указанные выбросы губительно влияют на здоровье человека, растительный и животный мир, разрушающим образом действуют на оборудование, сооружения, постройки. Свести выбросы к минимуму позволяет контроль исходного сырья и применение мокрых скрубберов. Показатели по выбросам пыли с диоксида серы приведены в табл. 8.4, 8.5.

Таблица 8.4. Выбросы пыли в атмосферу при производстве драгоценных металлов

Технологический показатель	Единица измерения	Процесс	Диапазон/значение
Пыль	мг/м ³	Переработка шлама	2–120
Пыль	мг/м ³	Аффинаж	2–10

Таблица 8.5. Выбросы диоксида серы в атмосферу при производстве драгоценных металлов

Технологический показатель	Единица измерения	Процесс	Диапазон/значение
SO ₂	мг/м ³	Переработка шлама	50–1500
SO ₂	мг/м ³	Аффинаж	50–100

РОЛЬ ПРОИЗВОДСТВА ДРАГОЦЕННЫХ МЕТАЛЛОВ В ГЛОБАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКЕ

Мировой рынок драгоценных металлов представляет собой совокупность международных и внутренних рынков, глобальную структуру круглосуточной торговли физическим металлом, практически без участия государственного регулирования. Он охватывает всю систему циркуляции драгоценных металлов в глобальном масштабе: производство, распределение, потребление.

На международном рынке драгоценных металлов обращаются золото, серебро и металлы платиноидной группы.

Рынок золота

Рынок золота имеет свои особенности:

Золото используется фактически всеми государствами в качестве страхового и резервного фонда. Учтенные государственные запасы золота, сосредоточенные в центральных банках и резервах МВФ, составляют сегодня более 31 000 т. Значительная часть этих запасов может быть выставлена на продажу.

Еще большие объемы золота имеются у населения (ювелирные украшения, монеты и др.). Часть этого золота также поступает на рынок в виде лома.

Основные страны — потребители золота четко подразделяются на две группы:

- первая группа технически развитых стран (Япония, США и Германия), которые используют золото в различных областях техники и промышленных отраслях. Здесь золото выступает как индикатор развития высоких технологий в электронной и электротехнической, космической, приборостроительной и других отраслях промышленности;
- вторая группа стран, в которых основная доля золота потребляется на нужды только ювелирной промышленности. На долю главного производителя ювелирных изделий

в Европе — Италии — приходится 15,6% золота, использованного в мировой ювелирной промышленности; на долю основного азиатского производителя золотых украшений — Индии — 15,2% золота. В России на технические нужды золота расходуется 15–17 т/год, т. е. 55–60% всего количества металла, потребленного в стране, а на изготовление ювелирных изделий — примерно 12 т/год (40–45%). Доля России среди стран — потребителей золота составляет около 1,0%. По этому показателю Россия находится в одном ряду с такими странами, как Испания, Мексика, Бразилия, Кувейт.

Мировое предложение золота по итогам 2018 г. выросло на 1% — до 4490,2 т. В частности, первичная добыча золота выросла на 1%, до нового максимума в объеме 3346,9 т; вторичная переработка — на 1%, до 1172,6 т. Глобальный портфель хеджевых контрактов сократился второй год подряд на 29,4 т, тогда как в 2017 г. снижение составило 27,9 т.

Мировой спрос на золото по итогам 2018 г. вырос на 4% — до 4345,1 т — по сравнению с 4159,9 т в 2017 г., в основном за счет роста покупок драгметалла центральными банками, достигших самого большого объема за последние 50 лет. Спрос на золото в 2018 г. соответствует пятилетнему среднему значению в 4347,5 т. Многолетний максимум покупок центральных банков составил 651,5 т, что выше показателя 2017 г. на 74%.

С 2000 г. золотой запас России пополнился на 862,2 т. При этом цена на благородный металл выросла более чем на 400%. Объемы производства золота в СССР и России приведены на рис. 8.5.

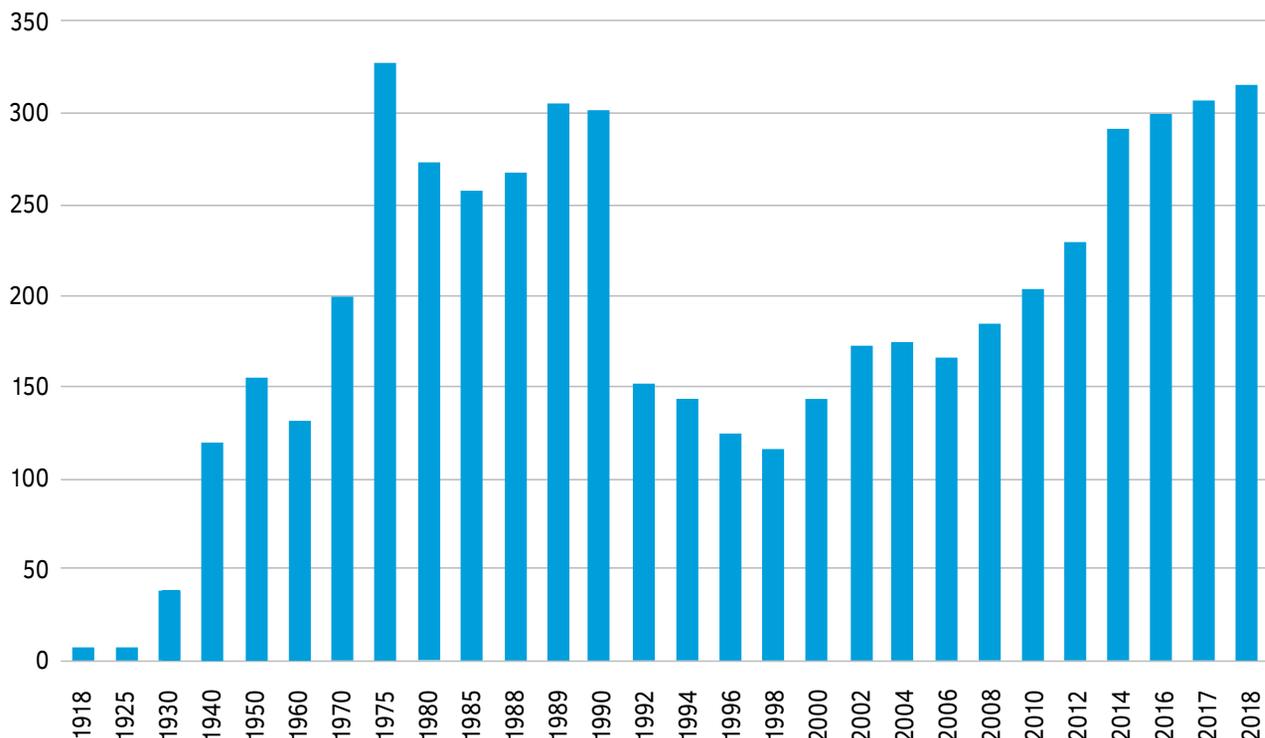


Рис. 8.5. Объемы производства золота в СССР и России, т

По данным Всемирного золотого совета, по состоянию на ноябрь 2018 г. золотой резерв России составляет 20 136,2 т (шестое место в мире) (табл. 8.6).

Эксперты отмечают повышение закупок золота Центральным банком России, считая, что связано это не с инвестиционной привлекательностью металла, а с недоверием к доллару США. Потребление золота для промышленного производства и других целей выросло до 105,94 т — на 17,48%. Австралия по итогам 2018 г. нарастила производство золота на 16 т — до 317 т (10,2 млн унц.), что стало самым высоким показателем в истории страны.

Таблица 8.6. Золотые резервы стран мира и международных организаций (т) и их доля в общем объеме национальных резервов (%)

№	Страна/Организация	1970 г.	1980 г.	1990 г.	2000 г.	2010 г.	2015 г.	2018 г.	Доля
1	США	9839,2	8221,2	8145,2	8136,9	8133,5	8133,5	8133,5	73,4
2	Германия	3536,6	2960,5	2960,5	3468,6	3401,0	3381,0	3369,7	68,8
3	МВФ	3855,9	3217,0	3217,0	3217,3	2814,0	2814,0	2814,0	
4	Италия	2565,3	2073,7	2073,7	2451,8	2451,8	2451,8	2451,8	65,1
5	Франция	3138,6	2545,8	2545,8	3024,6	2435,4	2435,5	2436,0	59,1
6	Россия (до 1991 г. — СССР)	1374,4	581,6	484,6	384,4	788,6	1352,2	2036,2	16,9
7	Китай		398,1	395,0	395,0	1054,1	1708,5	1841,3	2,2
8	Швейцария	2427,0	2590,3	2590,3	2419,4	1040,1	1040,0	1040,0	5,0
9	Япония	473,2	753,6	753,6	763,5	765,2	765,2	765,2	2,3
10	Нидерланды	1588,2	1366,7	1366,7	911,8	612,5	612,5	612,5	65,5
11	Индия	216,3	267,3	332,6	357,8	557,7	557,7	579,9	5,5
12	ЕЦБ				747,4	501,4	504,8	504,8	25,9
13	Тайвань	72,9	97,8	421,0	421,8	423,6	423,6	423,6	3,4
14	Португалия	801,5	689,6	492,4	606,7	382,5	382,5	382,5	63,1
15	Узбекистан							367,0	51

Рынок серебра

Мировые запасы серебра оцениваются в 512 тыс. т, а ежегодная добыча составляет около 25 тыс. т, причем на долю России приходится 6–7% от этого количества (табл. 8.7).

Таблица 8.7. Использование сырьевой базы серебра Российской Федерации, т

	2016 г.	2017 г.
Производство аффинированного серебра из руд и концентратов	886	798
Производство аффинированного серебра из вторичного сырья	203	246,3
Экспорт аффинированного серебра	526,5	852,9
Импорт аффинированного серебра	45,7	63

В последние годы Россия стабильно входит в пятерку ведущих продуцентов серебра, извлекаемого из минерального сырья, а в 2017 г. страна заняла четвертую строчку, уступив только Мексике, Перу и Китаю, несмотря на заметное сокращение производства относительно 2016 г. (табл. 8.8).

Таблица 8.8. Запасы серебра и объемы его производства в ведущих странах

Страна	Запасы, категория	Запасы, т	Производство, т	Доля в мировом производстве, %
Мексика	Proved + Probable Reserves	112,1	6108	23
Перу	Proved + Probable Reserves	123,0	4587	17
Китай	Ensured Reserves	38,5	3502	13
Россия	Запасы категорий А+В+С ₁ разрабатываемых и осваиваемых месторождений (без учета Холоднинского)	44,6	1305	5
Чили	Proved + Probable Reserves	38,9	1260	5

Российскую сырьевую базу серебра составляют как собственно серебряные (серебряные и золотосеребряные, удельная стоимость серебра в которых превышает 50%), так и комплексные серебряносодержащие месторождения.

Физический спрос на серебро в мире по итогам 2018 г. вырос до 1033,5 млн унций (32,146 тыс. т) против 998,4 млн унций годом ранее на фоне сильного восстановления спроса на монеты и слитки.

Из общего объема ювелирный спрос вырос на 4%, до 212,5 млн унций; промышленный спрос сократился на 1%, до 578,6 млн унций; спрос на монеты и слитки подскочил на 20,5%, до 181,2 млн унций.

В то же время предложение металла на рынке снизилось на 2,7%, до 1004,3 млн унций, из-за снижения объемов первичной добычи. Так, добыча металла сократилась на 2,4% до 855,7 млн унций, вторичное предложение — на 1,6%, до 151,3 млн унций.

Таким образом, баланс физического металла на рынке был на стороне дефицита, который составил 29,2 млн унций против избытка в 3,2 млн унций в 2017 г.

Резервы металла в биржевых продуктах упали до отрицательных 29,2 млн унций в 2018 г. по сравнению с положительными 34,2 млн унций годом ранее, а биржевые запасы выросли до 71,2 млн унций с 51,5 млн унций. Таким образом, чистый баланс металла на рынке также был в дефицитной зоне, при этом значительно нарастив объемы в четыре раза до 80,1 млн унций с 19,7 млн унций в 2017 г.

Средняя цена на металл по итогам 2018 г. сократилась до 15,71 долл./унция против 17,05 долл./унция в 2017 г. (снижение на 7,9%).

Мировой физический спрос на серебро в 2018 г. вырос на 4%. В России от четверти до половины добытого серебра ежегодно экспортируется в виде аффинированного металла и в составе концентратов цветных и благородных металлов. В 2016 г. экспорт серебра сократился на 43% против предыдущего года и составил 526,5 т. Главным покупателем российского серебра является Индия, на долю которой приходится более 60% закупок; сокращение их было главной причиной сокращения зарубежных поставок. Частично оно скомпенсировано ростом продаж в Великобританию и Швейцарию.

В 2017 г. экспорт серебра из России вырос до 852,9 т, в основном благодаря восстановлению спроса со стороны индийских покупателей.

Импорт серебра в сырьевых товарных продуктах и аффинированном виде невелик, в 2016 г. он составлял 45,7 т, в 2017 г. увеличился до 63 т.

Рынок металлов платиновой группы

Что касается запасов металлов платиновой группы (МПГ), то они преимущественно сосредоточены на территории Южно-Африканской Республики (порядка 90% всех мировых запасов), на втором месте — Россия (табл. 8.9).

Данные по предложению платиновых металлов в мире включают оценочный объем продаж первичных МПГ добывающими компаниями по странам добычи (табл. 8.10). Показатели брутто-спроса для каждой области применения — это сумма производственных потребностей в металле и любых изменений объемов переработанного металла в данном секторе. Увеличение запасов переработанного металла приводит к созданию дополнительного спроса, а сокращение запасов снижает уровень спроса. Показатели нетто-спроса равны брутто-спросу в каждой области применения за вычетом объемов утилизированного металла в этой отрасли, независимо от того, использовали повторно этот металл или он был продан для других целей.

Для редких платиновых металлов — иридия, рутения — предложение существенно превышает спрос. Суммарный спрос на осмий, который является самым редким и наименее изученным элементом из группы платиновых металлов, оценивается в первые десятки килограммов.

Таблица 8.9. Использование сырьевой базы металлов платиновой группы Российской Федерации, т

	2016 г.	2017 г.
Производство рафинированных МПГ, в том числе	99,5	106
– платина	20,5	22
– палладий	78,3	85,2
Экспорт рафинированных МПГ, в том числе	111,2	103,4
– платина	17,3	20,7
– палладий	90,2	79,3
Импорт рафинированных МПГ, в том числе	0,2	0,1
– платина	0,05	0,05
– палладий	0,1	0,02

Таблица 8.10. Предложение и спрос на платину, т

	2013 г.	2014 г.	2015 г.
Предложение			
Южная Африка	130,9	110,0	142,1
Россия ¹	22,9	21,8	20,8
Северная Америка	9,9	10,5	9,9
Зимбабве ²	12,8	12,5	12,5
Прочие ³	4,4	4,1	3,6
Итого предложение	180,9	158,9	188,9
Спрос			
Автокатализаторы	96,4	100,8	106,7
Химическая промышленность	16,4	16,2	16,5
Электротехника	6,8	7,1	7,2

¹ Общий объем МПГ, поставляемый во все регионы, включая Россию и страны бывшего СССР. Данные по предложению из России разделены на продажи первичного металла и реализации государственных запасов.

² МПГ, добываемые в Зимбабве, перерабатываются в настоящее время в Южной Африке.

³ Поставки из Зимбабве выделены из предложения прочих производителей.

Мировая торговля МПГ на 2017 г. составляет 23–29 млрд долл. США. Основными потребителями МПГ являются в основном промышленно развитые страны. Крупнейший потребитель платины — Германия, лидер в производстве дизельных автомобилей. США — лидер по потреблению палладия, так как является одним из крупнейших рынков бензиновых автомобилей.

Объем мирового экспорта МПГ (рис. 8.6) в натуральном выражении несколько превышает производство в 2009–2017 гг. Это свидетельствует о присутствии в торговле полуфабриката (концентрата), который продается для аффинажа в других странах, и отчасти о перепродаже металла, произведенного ранее и находящегося в запасах. Динамика торговли отражает тенденции производства металлов. Снижение объемов торговли в денежном выражении происходит не только из-за снижения цены, но и из-за замедления предложения в натуральном объеме.

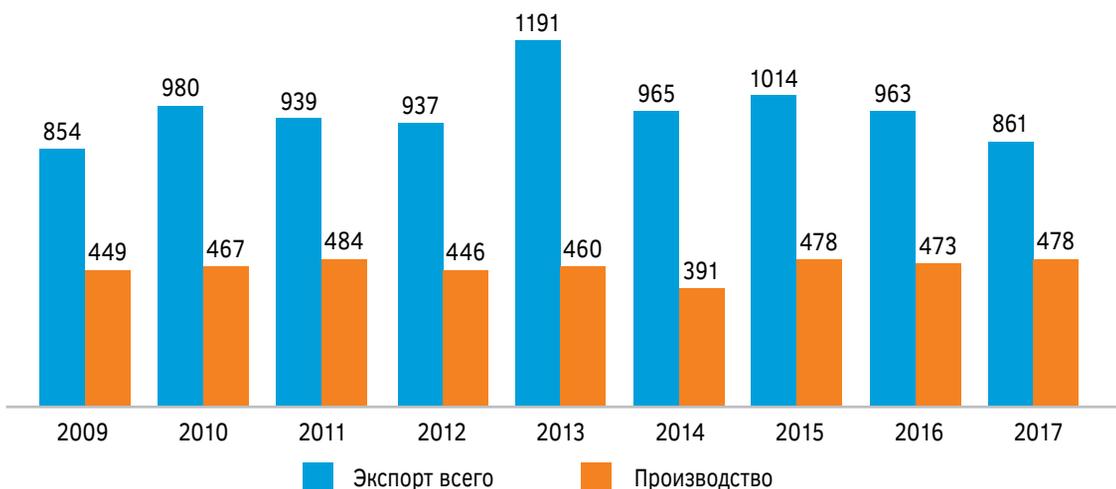


Рис. 8.6. Производство и экспорт МПГ в мире, т

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ДРАГОЦЕННЫХ МЕТАЛЛОВ

В современной экономике роль драгоценных металлов существенно изменилась: золото больше не является «мировыми деньгами», но благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам драгоценные металлы все шире входят в сферу промышленного производства, особенно в отраслях, использующих новейшие технологии. Высокая удельная ценность (редкость, компактность, возможность неоднократного потребления и длительного использования), ликвидность (развитая сеть сбыта и постоянный спрос) определяют использование драгоценных металлов и камней в качестве финансовых активов (рис. 8.7).

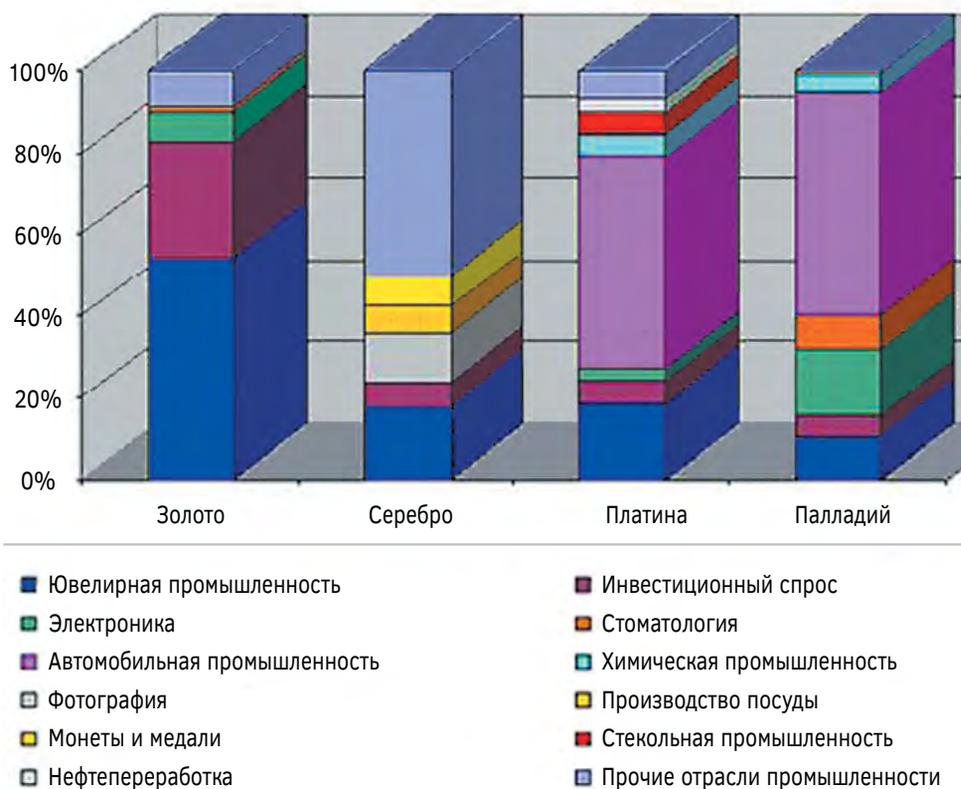


Рис. 8.7. Структура спроса на драгоценный металл

Золото

Золото, сохраняя с давних времен роль денежного эквивалента, в чистом виде применяется в относительно небольших количествах в медицине, для золочения и изготовления разрывных контактов. Основную часть золота используют в виде сплавов. Наиболее широкое распространение имеют золотые сплавы в ювелирной технике. К ювелирным сплавам золота относятся его сплавы с медью и серебром, а также с добавками платины, палладия, цинка, олова и других металлов. В зубопротезной практике применяют сплавы золота с медью, серебром, платиной, кадмием и цинком.

Золотые сплавы находят применение и в ряде современных областей техники: космической, ядерной, ракетной и реактивной.

Спрос на золото для промышленности составляет несколько сотен тонн в год. Больше количество материала используется в электронной отрасли, где из него изготавливают детали для сотовых телефонов, компьютерной и бытовой техники.

Способность материала отражать излучение (ультрафиолетовое, инфракрасное) позволяет использовать его в качестве покрытия для космических кораблей и спутников.

Как добавка, улучшающая физико-химические параметры изделия, золото применяется при изготовлении специальных видов стекла для иллюминаторов. В химической промышленности его используют в качестве катализатора и для изготовления деталей, которым надо придать устойчивость к внешним условиям. Недавними исследованиями установлена целесообразность применения золота в топливной системе автомобилей.

Особенное свойство материала хорошо проводить тепло используется при нанесении защитных покрытий на детали. В часовом производстве проводят золочение корпусов гальваническим методом.

Свойство золотого припоя отлично смачивать поверхности из разных металлов позволяет применять его при пайке. Золото используют для изготовления нитей, а тонкими пластинками покрывают художественные изделия.

Спрос на золото в промышленности является относительно устойчивым. По его техническому использованию лидером на рынке являются США, Япония и Германия, где металл используется в технологическом процессе, связанном с приборостроением, изготовлением деталей реактивных двигателей, космических аппаратов, ядерных реакторов.

Большой спрос на золото в различных отраслях промышленности. Более 50% это объема направлено на электронную промышленность (электро-, радио- и видеоаппаратура), 20% составляет зубопротезирование, остальное распределяется между промышленно-бытовым потреблением (изготовление золотых нитей, золочение одежды и дизайнерской фурнитуры) (табл. 8.11).

Таблица 8.11. Общая структура потребления золота в мире в 1970–2012 гг., т*

	1970	1975	1980	1984	1994	1996	2005	2006	2012
Добыча из недр	1252,7	910,2	895,7	1058,5	2209,0	2284,0	2450,0	2500,0	2613,0
Область применения									
Ювелирные изделия	1066	516	127	819	2604	2807	2709	2190	1908
Зубопротезирование	58	63	64	51	52	55	62	60	40
Монеты, медали	91	272	201	174	75	60	37	45	315
Электроника	89	66	89	122	192	207	273	312	303
Прочее потребление (вкл. слитки и ETF)	62	57	66	53	200	348	646	663	1306
Суммарный расход	1366	974	547	1219	3361	3477	3727	3270	4406
Средняя за год цена золота, \$US/г	1,0	4,2	19,7	13,0	11,9	12,5	14,2	19,3	54,1

* С 1970 по 1984 г. без учета СССР и Китая.

Серебро

Благодаря своим уникальным свойствам: высоким степеням электро- и теплопроводности, отражательной способности, светочувствительности и т. д. — серебро имеет очень широкий диапазон применения. Его применяют в электронике, электротехнике, ювелирном деле, фотографии, точном приборостроении, ракетостроении, медицине, для защитных и декоративных покрытий, для изготовления монет, медалей и других памятных изделий. Области применения серебра постоянно расширяются, и его применение — это не только сплавы, но и химические соединения (рис. 8.8).

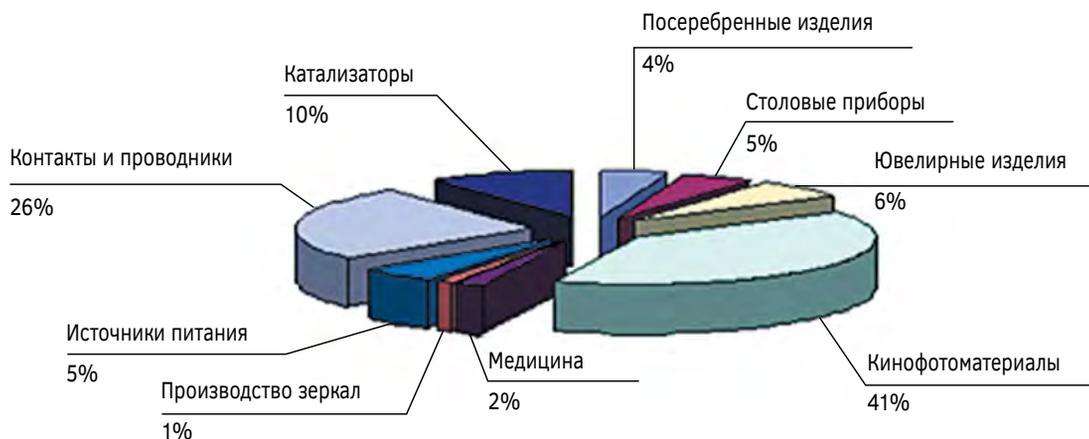


Рис. 8.8. Потребление серебра в промышленности

Серебро обладает наибольшей электропроводностью, теплопроводностью и стойкостью к окислению кислородом при обычных условиях. Поэтому оно широко применяется для контактов электротехнических изделий, например, контактов реле, ламелей, а также для многослойных керамических конденсаторов, в СВЧ-технике — как покрытие внутренней поверхности волноводов.

Медно-серебряные припои ПСр-72, ПСр-45 и другие применяют для пайки разнообразных ответственных соединений, в том числе разнородных металлов.

Большое количество серебра постоянно расходуется для производства серебряно-цинковых и серебряно-кадмиевых аккумуляторных батарей, обладающих очень высокой энергоплотностью и массовой энергоёмкостью и способных при малом внутреннем сопротивлении выдавать в нагрузку очень большие токи.

Галогениды серебра и нитрат серебра применяют в фотографии, так как они обладают высокой светочувствительностью. Йодистое серебро применяется для управления климатом («разгон облаков»).

Используется как покрытие для зеркал с высокой отражающей способностью (в обычных зеркалах используется алюминий).

Серебро применяется в качестве добавки (0,1–0,4%) к свинцу для отливки токоотводов положительных пластин специальных свинцовых аккумуляторов (очень большой срок службы (до 10–12 лет) и малое внутреннее сопротивление).

Как катализатор в реакциях окисления, например, при производстве формальдегида из метанола, а также эпоксида из этилена.

Хлорид серебра применяется в хлор-серебряно-цинковых батареях, а также для покрытий некоторых радарных поверхностей. Кроме того, хлорид серебра, прозрачный в инфракрасной области спектра, используется в инфракрасной оптике.

Фосфат серебра применяется для варки специального стекла, используемого для дозиметрии излучений. Монокристаллы фторида серебра применяются для генерации лазерного излучения с длиной волны 0,193 мкм (ультрафиолетовое излучение).

Ацетиленид серебра (карбид) изредка применяется как мощное инициирующее взрывчатое вещество (детонаторы).

Перманганат серебра, кристаллический темно-фиолетовый порошок, растворимый в воде; применяется в противогасах. В некоторых специальных случаях серебро также используется в сухих гальванических элементах следующих систем: хлор-серебряный элемент, бром-серебряный элемент, йод-серебряный элемент.

Серебро — уникальный драгоценный металл, который, по мнению отдельных экспертов и ученых, сегодня недооценен человечеством. Серебро имеет большой потенциал применения в различных сферах жизнедеятельности человека. Если, по крайней мере, какая-то часть из этих сфер обретет популярность, стоимость серебра на рынке однозначно существенно возрастет.

Металлы платиновой группы

Основным потребителем металлов платиновой группы является автопром. Платина применяется в каталитических нейтрализаторах дизельных двигателей, палладий — в бензиновых двигателях. С 1979 г. автомобильная промышленность стала основным потребителем МПГ. Палладий, платина и родий использовались в качестве катализатора окисления в каталитических нейтрализаторах для очистки выхлопных газов автомобилей. Германия — лидер в производстве дизельных автомобилей. США — лидер по потреблению палладия, так как является одним из крупнейших рынков бензиновых автомобилей (рис. 8.9, 8.10).



Рис. 8.9. Потребление палладия в автомобильной промышленности по странам (2017 г.)

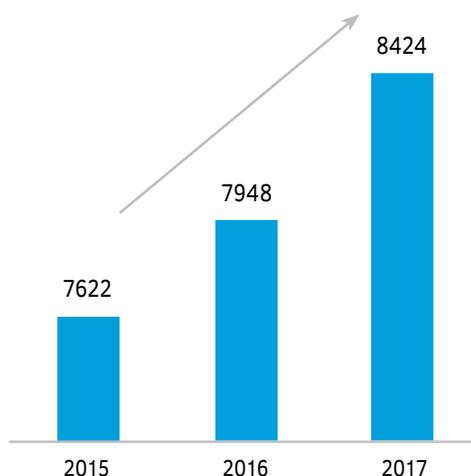


Рис. 8.10. Динамика потребления палладия в мировой автомобильной промышленности, тыс. тр. унций

Из всех платиновых металлов наибольшее применение имеет платина. До Второй мировой войны свыше 50% платины служило для изготовления ювелирных изделий. В последние 2–3 десятилетия около 90% платины потребляется для научных и промышленных целей. Из платины делают лабораторные приборы: тигли, чашки, термометры сопротивления и др., применяемые в аналитических и физико-химических исследованиях. Около 50% потребляемой платины (частично в виде сплавов с Rh, Pd, Ir) применяют в качестве катализаторов в производстве азотной кислоты окислением NH_3 , в нефтехимической промышленности и мн. др. Платину и ее сплавы используют для изготовления аппаратуры для некоторых химических производств. Около 25% платины расходуется в электротехнике, радиотехнике, автоматике, телемеханике, медицине. Применяется платина и как антикоррозионное покрытие.

Ir применяют главным образом в виде сплава Pt + 10% Ir. Из такого сплава сделаны международные эталоны метра и килограмма. Из него изготовляют тигли, в которых выращивают кристаллы для лазеров, контакты для особо ответственных узлов в технике слабых токов. Из сплава Ir с Os делают опоры для стрелок компасов и других приборов.

Способностью сорбировать H_2 и катализировать многие химические реакции обладает Ru; он входит в состав некоторых сплавов, обладающих высокой твердостью и стойкостью против истирания и окисления. Rh благодаря своей способности отражать около 80% лучей видимой части спектра, а также высокой стойкости против окисления является хорошим материалом для покрытия рефлекторов прожекторов и зеркал точных приборов. Но главная область его применения — сплавы с Pt, из которых изготовляют лабораторную и заводскую аппаратуру, проволоку для термоэлектрических пирометров и др.

ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ

С каждым годом наблюдается увеличение спроса на драгоценные металлы, что вызывает настоятельную необходимость, наряду с поиском новых источников, в усовершенствовании существующих технологий их производства. Указанное обстоятельство предполагает в первую очередь повышение полноты и комплексности использования первичного и вторичного сырья. Возрастающий объем и одновременное снижение качества поступающего на переработку сырья требуют разработки и внедрения высокоэффективных процессов, обеспечивающих получение селективных концентратов драгоценных металлов и самих металлов, сокращение объемов незавершенного производства, снижение энергозатрат, уменьшение потерь драгоценных металлов, возможность автоматизации процессов, улучшение условий труда.

Перспективные технологии производства золота и серебра

Основным методом извлечения золота и серебра из руд и концентратов различного состава пока остается цианидное выщелачивание в щелочной среде. Вместе с тем не прекращаются работы по созданию технологий, не использующих этот чрезвычайно токсичный растворитель. Серьезного рассмотрения с точки зрения возможности применения заслуживают исследования, направленные на использование таких реагентов, как тиокарбамид, тиосульфаты, галогены (хлор, бром, йод) в щелочных растворах, некоторые органические соединения (например, гуматы и аминокислоты).

Наиболее перспективным вариантом из перечисленных является технология, основанная на тиокарбамидном (тиомочевинном) выщелачивании материалов, содержащих золото и серебро, в кислой среде. Исходное сырье подвергают выщелачиванию тиокарбамидом в кислом (как правило, серноокислом) растворе в присутствии окислителя (чаще всего хлорида или сульфата железа (III)). Затем из полученного раствора извлекают драгоценные металлы в виде смешанных тиокарбамидных и тиоцианатных комплексов смесью экстрагентов: три-*n*-бутилфосфата и дифенилтиокарбамида в керосине. Реэкстракцию золота и серебра из органической фазы проводят растворами восстановителей (формальдегид, соли гидразина, щавелевая кислота, тетрагидробораты ипр.). Следует подчеркнуть, что введение в раствор на стадии экстракции тиоцианат-ионов обеспечивает полноту извлечения драгоценных металлов в органическую фазу. Образовавшаяся после реэкстракции водная фаза, содержащая тиокарбамид, может быть направлена в оборот на стадию выщелачивания или промывки кека выщелачивания.

Широкое промышленное применение тиокарбамидных растворов взамен цианидных сдерживается, безусловно, более высокой стоимостью данного реагента по сравнению с цианидом натрия.

Тиокарбамидным выщелачиванием можно воспользоваться при переработке свинцово-цинковых кеков, причем эффективность процесса повысится при электровыщелачивании. Золото- и/или серебросодержащий осадок выделяется на катоде, а на аноде происходит выделение газообразного кислорода.

Перспективные технологии производства металлов платиновой группы

Существующая в России технология аффинажа металлов платиновой группы базируется преимущественно на осадительных методах и приемах. Такая технология неизбежно сопровождается образованием промежуточных продуктов и маточных растворов, что делает ее многооперационной и приводит к уменьшению сквозного извлечения драгоценных металлов.

Экстракционные методы, внедренные на отдельных предприятиях Российской Федерации, также обладают рядом недостатков, к которым следует отнести прежде всего неизбежные потери экстрагентов и растворителей, вследствие их частичной растворимости в воде и испарения; невысокие коэффициенты распределения; медленную кинетику.

Перечисленные недостатки могут быть преодолены при условии закрепления реагента, взаимодействующего с извлекаемым ценным компонентом, на не растворимой в воде матрице с развитой поверхностью.

Учитывая неоспоримые преимущества сорбции по сравнению с экстракцией, ее необходимо организовать в сорбционном колоночном варианте. Она даст возможность провести разделение близких по свойствам МПГ и их отделение от сопутствующих цветных металлов, железа, свинца, титана, серебра.

Общее число производимых сорбентов измеряется десятками тысяч, причем постоянно появляются новые сорбенты и одновременно развиваются научные исследования по их синтезу и применению для решения тех или иных задач.

Наиболее прогрессивной в настоящее время представляется «технология молекулярного распознавания» (ТМР) (в зарубежной литературе обозначается термином MRR — *method of molecular recognition*).

Технология молекулярного распознавания наиболее перспективна для селективного извлечения МПГ из сложных по составу технологических растворов. ТМР обеспечит такую высокую эффективность разделения МПГ, как ни одна из известных технологий.

Применение ТМР для выделения и разделения МПГ позволит:

- значительно сократить время процесса за счет быстрой кинетики разделения и в цикле насыщения, и в цикле элюирования;
- сократить объем использованных реагентов;
- выполнять работу в непрерывном режиме;
- существенно увеличить коэффициенты разделения между отдельными металлами платиновой группы и между МПГ и примесями неблагородных металлов;
- фактически в одну стадию получить высокочистый металл.

Принимая во внимание необходимость создания высокоэкономичной технологии, здесь следует сделать вывод, что использование дорогостоящих макроциклических соединений для решения проблемы разделения близких по свойствам МПГ нецелесообразно. Развитие технологии молекулярного распознавания пойдет по пути конструирования реагентов, максимально «настроенных» на заданный ион или молекулу за счет тонкого сочетания энергетических и пространственных факторов. Это позволит удовлетворить требования времени по селективности и эффективности выделения драгоценных металлов из технологических растворов и минимизации отходов и выбросов окружающую среду.

Необходимо обратить внимание на то, что в качестве элюентов в процессе ТМР используются широко распространенные дешевые реагенты (соляная кислота, хлорид аммония, гидрат аммиака, хлорид натрия и т. п.), обеспечивающие выделение МПГ в виде

труднорастворимых солей, получение из которых самих металлов детально изучено и трудностей не вызывает. Следует также отметить, что технология применяется и для очистки от меди цианидных растворов, содержащих золото и серебро.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Баликов, С. В.* Аппаратурное оформление пирометаллургической переработки золотосодержащих продуктов / С. В. Баликов, В. Е. Дементьев, Ю. Л. Николаев [и др.] // Добыча и переработка золото- и алмазосодержащего сырья : сб. науч. трудов. — Иркутск, 2001. — С. 152–167.
2. *Баликов, С. В.* Плавка золотосодержащих концентратов / С. В. Баликов, В. Е. Дементьев, Г. Г. Минеев. — Иркутск : ОАО «Иргиредмет», 2002. — 323 с.
3. *Бочаров, В. А.* Технология переработки золотосодержащего сырья / В. А. Бочаров, В. А. Игнаткина, Д. В. Абрютин. — М. : Изд. дом МИСиС, 2011. — 328 с.
4. *Буслаева, Т. М.* Технология «молекулярного распознавания» в аффинаже платиновых металлов / Т. М. Буслаева, Д. В. Дробот // Цветные металлы. — 2005. — № 10. — С. 77.
5. ГОСТ 6835–2002. Золото и сплавы на его основе. — Введ. 2003–07–01. — М. : Стандартинформ, 2007.
6. ГОСТ 6836–2002. Серебро и сплавы на его основе. — Введ. 2003–01–01. — М. : Стандартинформ, 2006.
7. *Давыдов, А. А.* Обеднение шлаков аффинажного производства электроплавкой в ОАО «Красцветмет» / А. А. Давыдов, В. Л. Сергеев, Э. В. Мальцев, А. В. Москалев, В. Н. Ефимов // Драгоценные металлы. Драгоценные камни. — 2010. — № 7. — С. 164–173.
8. *Давыдов, А. А.* Обеднение шлаков аффинажного производства электроплавкой в ОАО «Красцветмет» / А. А. Давыдов, В. Л. Сергеев, Э. В. Мальцев, А. В. Москалев, В. Н. Ефимов // Драгоценные металлы. Драгоценные камни. — 2010. — № 7. — С. 164–173.
9. ИТС 14–2016. Производство драгоценных металлов / Росстандарт. — М. : Бюро НДТ, 2016. — 173 с.
10. *Котляр, Ю. А.* Металлургия благородных металлов / Ю. А. Котляр, М. А. Меретуков. — М. : АСМИ, 2002. — 466 с.
11. *Ламуев, В. А.* Получение серебра из свинцово-цинковых руд / В. А. Ламуев, А. Н. Гуляшинов // Фундаментальные исследования, 2005. — № 9. — С. 36.
12. *Масленицкий, И. Н.* Металлургия благородных металлов / И. Н. Масленицкий : учеб. для вузов / под общ. ред. Л. В. Чугаева. — М. : Металлургия, 1987. — 432 с.
13. Министерство финансов Российской Федерации [официальный сайт]. — URL: <http://minfin.ru> (дата обращения: 29.10.2019).
14. *Николаев, Ю. Л.* Опыт разработки, внедрения и промышленной эксплуатации технологии бесколлекторной руднотермической плавки золотосодержащих продуктов / Ю. Л. Николаев, А. А. Синакевич, Ю. Е. Емельянов // Цветные металлы. — 2000. — № 4. — С. 83–84.
15. Пат. 2086684 Российская Федерация, МПК С22 В 11/02. Шихта для получения золотосеребряного сплава / С. Г. Рыбкин, А. И. Карпукhin, В. Е. Дементьев [и др.]. — Заявл. 06.09.95 ; опубл. 10.08.97.
16. Пат. 2110592 Российская Федерация, МПК С22 В 11/00, С22 В 3/38. Способ получения золота высокой чистоты / А. Н. Драенков, А. Н. Татаринцев, В. А. Кутилов [и др.]. — Заявл. 29.05.97 ; опубл. 10.05.98.
17. Пат. 2162897 Российская Федерация, МПК С22 В 11/02. Способ извлечения благородных металлов из серебросодержащих концентратов / С. Б. Полонский, В. И. Седых, И. М. Седых. — Заявл. 07.12.99 ; опубл. 10.02.01.
18. Пат. 2200132 Российская Федерация, МПК С01 G 55/00. Способ извлечения и разделения металлов платиновой группы / В. П. Карманников, Ю. Н. Назаров, М. С. Игумнов [и др.]. — Заявл. 03.15.02 ; опубл. 10.03.03.
19. Пат. 2215802 Российская Федерация, МПК С22 В 11/02. Способ переработки концентратов, содержащих благородные металлы / С. Г. Рыбкин. — Заявл. 27.12.01 ; опубл. 10.11.03.
20. Пат. 2219264 Российская Федерация, МПК С22 В 11/02. Способ переработки концентратов, содержащих цветные и благородные металлы / С. Г. Рыбкин, Ю. Л. Николаев, Е. П. Николаева, С. Б. Полонский. — Заявл. 11.03.2002 ; опубл. 20.12.03, бюл. № 35.
21. Пат. 2316606 Российская Федерация, МПК С22 В 11/02. Способ переработки сульфидных концентратов, содержащих свинец, цветные и благородные металлы / С. Г. Рыбкин, В. П. Бескровная, В. Г. Баранкевич [и др.]. — Заявл. 25.04.06 ; опубл. 02.10.08.
22. Пат. 2351667 Российская Федерация, МПК С22 В 3/06, С22 В 11/00. Способ переработки цинксодержащих золотосеребряных цианистых осадков / В. Д. Ильяшевич, С. Н. Мамонов, В. Н. Ефимов. — Заявл. 10.10.07 ; опубл. 20.04.09.
23. Пат. 2395598 Российская Федерация, МПК С22 В 11/02. Способ переработки концентратов, содержащих благородные металлы и сульфиды / С. Г. Рыбкин, Ю. Л. Николаев,

- Е. В. Богородский [и др.]. — Заявл. 18.11.08 ; опубл. 27.07.10.
24. Плеханов, К. А. Производство аффинированных золота и серебра на АО «Уралэлектромедь» / К. А. Плеханов, А. Б. Лебедь, С. С. Набойченко, Д. Ю. Скопин // Цветные металлы. — 1999. — № 5. — С. 27–29.
25. Романтеев, Ю. П. Металлургия благородных металлов / Ю. П. Романтеев. — М. : Учеба, 2007 — 261 с.
26. Рыбкин, С. Г. Опыт разработки и внедрения безобжиговой технологии пирометаллургической переработки золотосодержащих концентратов и цинковых осадков : тез. Третьего Всерос. симп. с междунар. участием «Золото Сибири и Дальнего Востока» / С. Г. Рыбкин, Ю. Л. Николаев. — Улан-Удэ : Изд-во БНЦ СО РАН, 2004. — С. 392–393.
27. Федеральный закон от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации» (с изменениями и дополнениями) // Гарант.ру : информационно-правовой портал. — URL: <http://base.garant.ru/71108018/> (дата обращения: 29.10.2019).
28. Nikolaev, Yu. L. The development of a non-roasting technology for polymetallic gold and silver-bearing sulfide concentrates treatment / Yu. L. Nikolaev, S. G. Ribkin // XXV International Mineral Processing Congress IMPC 2010 «Smarter Processing for the Future», Brisbane, Australia, 6–10 September 2010 : Congress Proceedings. — Brisbane, 2010. — P. 1579–1584.
29. World Gold Council [official website]. — URL: <http://www.gold.org> (accessed: 29.10.2019).
30. World Silver Survey [website]. — URL: <http://thomsonreuterseikon.com/markets/metal-trading/>

ПРОИЗВОДСТВО АЛЮМИНИЯ

Михаил Львович Рахманов

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
профессор, доктор технических наук

Ольга Сергеевна Ежова

Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики»,
старший инженер

ВВЕДЕНИЕ

Алюминий — химический элемент III группы периодической системы элементов Д. И. Менделеева, легкий и пластичный металл матово-серебристого цвета. Вследствие высокой химической активности алюминий в природе встречается только в связанном виде.

Плотность (при нормальных условиях) — $2,69 \text{ г/см}^3$, электропроводность — $37 \cdot 10^6 \text{ См/м}$.

Уникальные свойства алюминия:

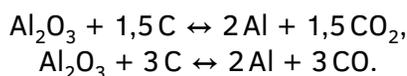
- на воздухе моментально образует оксидную защитную пленку, которая способствует высокой коррозионной стойкости металла;
- низкая плотность при высокой прочности;
- неизменность свойств при низких температурах.

Алюминий обладает амфотерными свойствами, т. е. реагируя с кислотами, образует соответствующие соли, а при взаимодействии со щелочами — алюминаты. Эта особенность существенно расширяет возможности извлечения алюминия из руд различного состава. Алюминий растворяется в серной и соляной кислотах, а также в щелочах, но концентрированная азотная и органические кислоты на алюминий не действуют. Механические свойства алюминия в значительной степени зависят от количества примесей в алюминии, его предварительной механической обработки и температуры. С увеличением содержания примесей прочностные свойства алюминия растут, а пластичные снижаются, которые проявляются и при изменении чистоты алюминия от 99,5 до 99,0%.

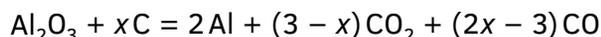
Благодаря таким свойствам, как малая плотность, высокая теплопроводность, низкое электрическое сопротивление, высокая пластичность, коррозионная стойкость, алюминий получил исключительно широкое распространение в различных отраслях современной техники и играет важнейшую роль среди всех цветных металлов. Чистый технический алюминий используется в электротехнике в качестве проводникового материала и для производства фольги. Основная часть алюминия применяется в виде литейных и деформируемых сплавов, и сравнительно небольшое количество алюминия — в виде порошков. К основным областям применения алюминия и его сплавов относятся аэрокосмическая промышленность, строительство, высокоскоростной железнодорожный и водный транспорт, автомобилестроение, электротехника, машины и турбинная техника, упаковка пищевых продуктов и напитков, криотехника, пиротехника и ракетное топливо, пищевая промышленность.

Практически единственным методом получения металлического алюминия является электролиз криолитоглиноземного расплава. Основное сырье для этого процесса — глинозем (Al_2O_3) — получают различными гидрохимическими методами путем переработки минералов, содержащих соединения алюминия.

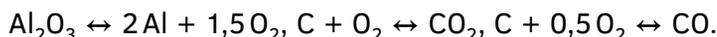
Современное получение алюминия осуществляется путем электролитического разложения глинозема (Al_2O_3), растворенного в электролите (расплавленный криолит (Na_3AlF_6)). Технологический процесс осуществляется при $950\text{--}965^\circ\text{C}$ в электролизных ваннах (электролизерах). В целом процесс разложения глинозема в электролизерах можно представить в виде формул:



Суммарную реакцию можно записать в виде:



или представить ее как сумму трех реакций:



Основным исходным сырьем криолит-глиноземного расплава являются глинозем (Al_2O_3), фтористый алюминий (AlF_3) и криолит (Na_3AlF_6). Кроме того, в электролите всегда присутствует фтористый кальций (CaF_2), снижающий температуру кристаллизации электролита, что позволяет проводить электролиз при более низкой температуре.

Технологический процесс в алюминиевом электролизере — сложный комплекс взаимосвязанных химических, физико-химических и физических процессов.

При электролизе на катоде выделяется алюминий. Алюминий, обладающий большей плотностью, чем исходный расплав, собирается на дне электролизера, откуда его периодически извлекают. Рентабельность производства алюминия определяется доступностью и ценой электроэнергии, наличием сырьевых компонентов и их качеством.

В табл. 9.1 представлены действующие в Российской Федерации предприятия алюминиевой промышленности, год ввода в эксплуатацию, производительность и применяемые технологии электролиза. Их географическое расположение представлено на рис. 9.1.

Таблица 9.1. Перечень предприятий алюминиевой промышленности Российской Федерации

№ на карте	Место расположения	Завод	Год ввода в эксплуатацию
1	г. Волгоград	ВГАЗ (<i>производство законсервировано</i>) Филиал ОАО «СУАЛ» «ВГАЗ-СУАЛ»	1959
2	Ленинградская область, г. Пикалево	Пикалевский глиноземный завод («Базэл Цемент Пикалево»)	1959
3	Республика Карелия, п. Надвоицы	НАЗ. Филиал ОАО «СУАЛ» «НАЗ-СУАЛ»	1954
4	Мурманская область, г. Кандалакша	КАЗ Филиал ОАО «СУАЛ» «КАЗ-СУАЛ»	1951
5	Свердловская область, г. Каменск-Уральский	УАЗ Филиал ОАО «СУАЛ» «УАЗ-СУАЛ»	1939
	Свердловская область, г. Краснотурьинск	БАЗ Филиал ОАО «СУАЛ» «БАЗ-СУАЛ»	1943
6	Кемеровская область, г. Новокузнецк	НКАЗ ОАО «РУСАЛ Новокузнецк»	1943
7	Республика Хакасия, г. Саяногорск	САЗ АО «РУСАЛ Саяногорск»	1985, 2006
8	Красноярский край, г. Красноярск	КраЗ ОАО «РУСАЛ Красноярск»	1964
	Красноярский край, г. Ачинск	АГК ОАО «РУСАЛ Ачинск»	1970
	Красноярский край, Богучанский район	БоАЗ ЗАО «Богучанский алюминиевый завод»	2015
9	Иркутская область, г. Братск	БрАЗ ОАО «РУСАЛ Братск»	1966
	Иркутская область, г. Шелехов	ИркаЗ Филиал ОАО «РУСАЛ Братск» в г. Шелехове	1960

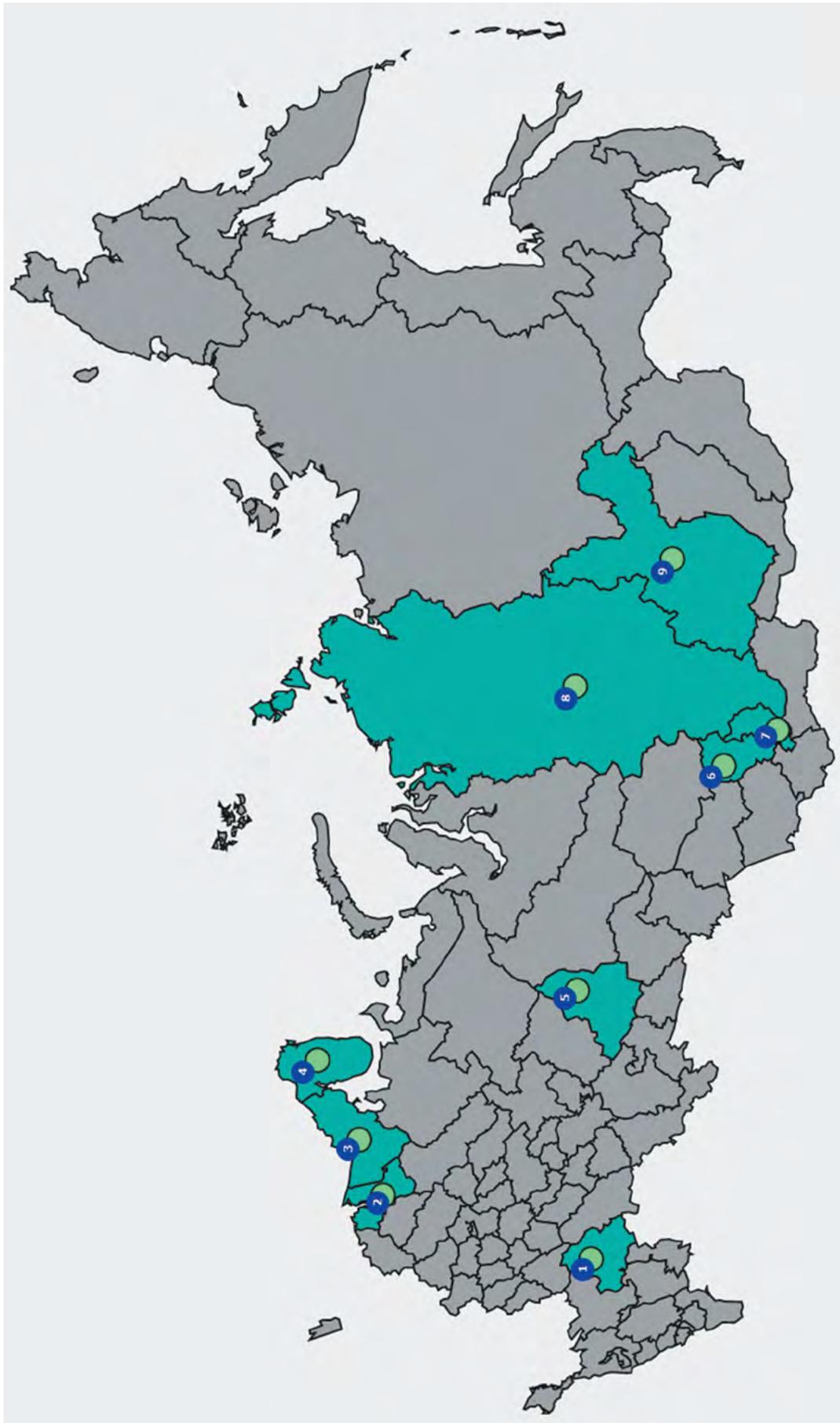


Рис. 9.1. Карта-схема расположения предприятий алюминиевой промышленности Российской Федерации

ИСТОРИЯ ЗАРОЖДЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Зарождение алюминиевой промышленности в мире

Человечество сталкивалось с алюминием задолго до того, как этот металл был получен. В «Естественной истории» римского ученого Плиния Старшего говорится о легенде I в., в которой мастер дарит императору Тиберию чашу из неизвестного металла — похожую на серебряную, но при этом очень легкую.

Достаточно широко в древности применялись квасцы — соль на основе алюминия. Полководец Архелай обнаружил, что дерево практически не горит, если его выдержать в растворе квасцов, — этим пользовались для защиты деревянных укреплений от поджогов. В античные времена квасцы применялись в медицине, при выделке кож, в качестве протравы при крашении тканей. В Европе, начиная с XVI в., квасцы использовались повсеместно: в кожевенной промышленности в качестве дубильного средства, в целлюлозно-бумажной — для проклеивания бумаги, в медицине — в дерматологии, косметологии, стоматологии и офтальмологии.

Именно квасцам (по-латински — *alumen*) алюминий обязан своим названием. Такое название металлу дал английский химик Гемфри Дэви, который в 1808 г. установил, что получить алюминий можно методом электролиза из глинозема (оксид алюминия), но подтвердить теорию практикой он не смог.

Успехом увенчались опыты ученого-физика из Дании Ханса Христиана Эрстеда, который через сильно нагретую смесь глинозема и угля пропустил газ хлор. В результате был получен хлорид алюминия. Затем, подогрев эту соль с амальгамой калия, Ханс Эрстед выделил металл, который по своим физическим свойствам был похож на олово. Ученый опубликовал статью о своем опыте в журнале, после чего прекратил свои эксперименты с этим металлом.

Этот способ выделения чистого алюминия путем нагревания хлористого алюминия вперемешку с калием в 1827 г. использовал немецкий химик Фридрих Велер, и ему понадобилось приблизительно 20 лет на то, чтобы получить алюминий в слитке.

Широкое распространение металл получил в 1854 г., когда французский физик и химик Анри Сент-Клер Девиль изобрел промышленный способ получения алюминия. Этот химический процесс был основан на вытеснении алюминия металлическим натрием из двойного хлорида натрия и алюминия. Таким образом был заменен дорогостоящий калий. Этим способом было получено более 200 т металлического алюминия в течение последующих 36 лет. А уже в 1856 г. этот французский ученый получил алюминий методом электролиза из расплавленного двойного хлорида натрия-алюминия.

Французский император Наполеон III восхитился способом получения металла из глинозема и имел планы по вооружению всей своей армии оружием из этого очень легкого металла. С этой целью было построено несколько алюминиевых заводов во Франции. Это был первый шаг в формировании будущей алюминиевой промышленности мира.

Однако процесс получения алюминия все еще оставался дорогостоящим. Более дешевый метод получения металла появился во второй половине XIX в. Независимо друг от друга новый способ выделения алюминия искали двое ученых — американский инженер и химик Холл Чарльз и французский инженер-химик Поль Луи-Туссен Эру. В 1887 г. Холл получил патент на новый электролитический способ получения алюминия. Этот способ заключался в электролизе расплавленного в криолите оксида алюминия и требовал большого количества электроэнергии, потому также был довольно дорогим.

Чуть позже австрийский инженер Байер создал новую технологию получения глинозема, и тогда этот способ стал более дешевым. С тех времен и поныне способы Байера и Поля Эру применяются на современных алюминиевых заводах.

Чистый алюминий является непрочным металлом, потому не подходит для многих сфер применения. Эта проблема была решена немецким инженером-металлургом Альфредом Вильмом.

В 1903 г. Альфред Вильм зафиксировал, что сплав алюминия с 4-процентной медью при температуре закалки 500°С после охлаждения при комнатной температуре около 100–120 часов, становится более твердым и прочным, но при этом не теряет своей пластичности. В 1911 г. в городе Дюрен была выпущена первая партия такого сплава алюминия и меди. Полученный металл был назван в честь города — дюралюминий. В 1919 г. был изготовлен первый самолет из дюралюминия.

Таким образом зародилась мировая алюминиевая промышленность, а сам металл получил широкое применение. В начале XX в. мировое производство алюминия составляло около 8000 т. А в XXI в. объем мирового производства металла достиг 24 млн т.

Зарождение алюминиевой промышленности в России

В дореволюционной России не было собственной алюминиевой промышленности. Однако в конце прошлого и в начале настоящего столетия русские ученые (Н. Н. Бекетов, П. П. Федотьев, Н. А. Пушин, Д. А. Пеняков, Е. И. Жуковский и другие) выполнили ряд исследований, сыгравших большую роль в развитии мировой алюминиевой промышленности. Под руководством П. П. Федотьева были проведены глубокие исследования теоретических основ электролитического способа получения алюминия, в частности были исследованы двойные системы фторид алюминия–фторид натрия, криолит–глинозем, явления растворимости алюминия в электролите, анодный эффект, а также ряд других процессов, связанных с электролизом криолито–глиноземных расплавов. Результаты этих исследований получили мировую известность.

В 1882–1892 гг. химик К. П. Байер разработал в России щелочной способ получения глинозема, который до настоящего времени является основным в мировой алюминиевой промышленности. В 1895 г. Д. А. Пеняков предложил способ получения глинозема из бокситов спеканием с сульфатом натрия в присутствии угля, а А. Н. Кузнецов и Е. И. Жуковский в 1915 г. — способ получения глинозема из низкосортных руд путем восстановительной плавки их на шлаки алюминатов щелочноземельных металлов. Н. А. Пушин с сотрудниками в 1914 г. впервые в нашей стране получил алюминий «русского происхождения», т. е. из отечественного сырья и материалов.

Условия для создания в нашей стране алюминиевой промышленности, являющейся крупным потребителем электроэнергии, появились только после Великой Октябрьской социалистической революции. Решающую роль в этом сыграл разработанный в 1920 г. по инициативе и под руководством В. И. Ленина план ГОЭЛРО, положивший начало созданию прочной энергетической базы в нашей стране. Построенная в соответствии с этим планом в 1926 г. первая крупная гидроэлектростанция на р. Волхов явилась энергетической базой первого в СССР Волховского алюминиевого завода. В декабре 1927 г. XV съезд ВКП(б) принял решение о создании в нашей стране алюминиевой промышленности, а в августе 1929 г. Совет труда и обороны принял решение о строительстве в СССР Волховского и Днепровского алюминиевых заводов. В 1929 г. на Ленинградском опытном заводе «Красный Выборжец» под руководством П. П. Федотьева были проведены длительные производственные испытания по получению алюминия электролитическим путем из отечественных материалов.

В 1930 г. в Ленинграде был пущен опытный завод, который сыграл большую роль в развитии советской алюминиевой промышленности. На этом заводе испытывалось оборудование, осваивался технологический режим, готовились рабочие и инженерно-технические кадры для первых советских алюминиевых заводов. Одновременно были проведены исследования по производству электродных изделий, необходимых для получения алюминия. Результаты этих исследований легли в основу проектирования первых электродных заводов — Московского и Днепровского. Разработанный в Институте прикладной минералогии способ получения криолита был положен в основу проектирования производства криолита на Полевском криолитовом заводе. В 1931 г. были созданы Научно-исследовательский институт алюминиевой промышленности (НИИСалюминий) и проектный институт «Гипроалюминий». Позднее НИИСалюминий и «Гипроалюминий» были объединены в единый Всесоюзный

алюминиево-магниевого института (ВАМИ). В период с 1926 по 1936 г. в Государственном институте прикладной химии (ГИПХ) под руководством А. А. Яковкина был разработан способ получения глинозема из тихвинских бокситов спеканием их с содой и известняком. В результате впервые была разрешена проблема переработки высококремнистых бокситов. В 1938 г. вошел в эксплуатацию Тихвинский глиноземный завод, а в 1939 г. на базе высококачественных североуральских бокситов — Уральский алюминиевый завод.

Зарождение и развитие отечественной алюминиевой промышленности в нашей стране неразрывно связано с Волховским алюминиевым заводом, который был построен на территории Ленинградской области и начал работать 14 мая 1932 г.

Как известно, дореволюционная Россия не располагала промышленными технологиями получения алюминия и не производила его. Первоочередные нужды страны в этом стратегическом металле (в объеме 5–6 тыс. т) даже в период первой мировой войны покрывались за счет импорта. Не были разведаны запасы сырья, отсутствовала необходимая энергетическая база.

Несмотря на то что теория электролитического способа получения алюминия была сформулирована в начале XX в. русским ученым П. П. Федотьевым, промышленную технологию пришлось создавать «с нуля». В 1929 г. на ленинградском заводе «Красный выборжец» под руководством П. П. Федотьева были впервые в стране проведены опыты по получению алюминия из отечественного сырья. В 1930 г. вошел в строй Ленинградский опытный алюминиевый завод.

Как свидетельствуют историки, 14 мая 1932 г. в 15 час 45 мин на Волховском заводе был получен первый советский алюминий. Эта дата стала «днем рождения» всей алюминиевой отрасли. Уже через два года наша страна полностью прекратила импорт этого стратегического металла, а к началу Великой Отечественной войны Советский Союз по выпуску алюминия вышел на одно из первых мест в мире. Промышленность отрасли бурно развивалась, создавались новые предприятия, но Волховский алюминиевый по-прежнему вносил существенный вклад в объемы производства.

ЦИКЛЫ РАЗВИТИЯ АЛЮМИНЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Алюминий — один из самых молодых металлов, открытых человеком. В чистом виде в природе он не встречается, поэтому получить его удалось лишь в XIX в., благодаря развитию химии и появлению электричества. За полтора века алюминий прошел невероятно интересный путь от драгоценного металла до материала, использующегося абсолютно в каждой сфере деятельности людей.

Таблица 9.2. Характеристика технологических циклов развития алюминиевой промышленности

Период, годы	Цикл	Основные виды деятельности технологического цикла	Технологические лидеры
1808–1885	Первый (открытие алюминия)	Украшения, предметы искусства, посуда	Великобритания, Германия, Франция, Дания
1886–1925	Второй (получение алюминия электролизом)	Судостроение, скульптуры, железнодорожный транспорт	Франция, Швейцария, США, СССР
1925 – настоящее время	Третий (широкое применение алюминия)	Судостроение, железнодорожный транспорт, автомобилестроение, авиация, космос, строительство	США, ЕС, Китай, Россия

Развитие алюминиевой промышленности происходило благодаря постоянно растущему спросу на алюминий, обусловленному технологическим прогрессом и развитием промышленности. По этой причине технологические циклы становления угольной отрасли можно соотнести с основными циклами развития мировой промышленности.

Таблица 9.3. Основные этапы циклов развития алюминиевой промышленности

Цикл	Научно-технический этап	Технико-экономический этап	Экономическо-социальный этап	Социально-регуляторный этап
Первый (открытие алюминия)	Получение алюминия химическими методами из глинозема	Совершенствование химических методов выделения алюминия	Рост потребления алюминия	Высокая трудоемкость производства алюминия, высокая цена
Второй (получение алюминия электролизом)	Получение алюминия методом электролиза	Применение дешевых и достаточно мощных источников электроэнергии	Рост потребления алюминия в различных отраслях промышленности	Усовершенствование электротехники, а также разработка новых способов извлечения глинозема
Третий (широкое применение алюминия)	Широкое применение алюминия	Толчок для развития новых отраслей промышленности	Ужесточения природоохранного законодательства, отказ от неэкологичных технологий	Производство алюминия с использованием инертных анодов

Первый цикл — открытие алюминия и получение алюминия химическими методами

Английский химик Гемфри Дэви в 1808 г. установил, что получить алюминий можно методом электролиза из глинозема (оксид алюминия), но подтвердить теорию практикой он не смог.

Это сделал датчанин Ханс Кристиан Эрстед в 1825 г. Ему удалось получить не чистый металл, а некий сплав алюминия с элементами, участвовавшими в опытах. Ученый сообщил об открытии и прекратил эксперименты.

Его работу продолжил немецкий химик Фридрих Велер, который 22 октября 1827 г. получил около 30 граммов алюминия в виде порошка. Ему понадобилось еще 18 лет непрерывных опытов, чтобы в 1845 г. получить небольшие шарики застывшего расплавленного алюминия (корольки).

Открытый учеными химический метод получения алюминия довел до промышленного применения выдающийся французский химик и технолог Анри-Этьенн Сент-Клер Девиль. Он усовершенствовал метод Велера и в 1856 г. совместно со своими партнерами организовал первое промышленное производство алюминия на заводе братьев Шарля и Александра Тиссье в Руане (Франция).

Получаемый металл был похож на серебро, был легким и при этом дорогим, поэтому в то время алюминий считался элитным материалом, предназначенным для изготовления украшений и предметов роскоши. Первыми продуктами из алюминия считаются медали с барельефами Наполеона III, который всячески поддерживал развитие производства алюминия, и Фридриха Велера, а также погребушка наследного принца Луи-Наполеона, выполненная из алюминия и золота.

Однако уже тогда Сент-Клер Девиль понимал, что будущее алюминия связано отнюдь не с ювелирным делом.

Второй цикл — получение алюминия электролизом (метод Холла — Эру)

Ситуация изменилась с открытием более дешевого электролитического способа производства алюминия в 1886 г. Его одновременно и независимо друг от друга разработали французский инженер Поль Эру и американский студент Чарльз Холл. Предложенный ими метод подразумевал электролиз расплавленной в криолите окиси алюминия и давал прекрасные результаты, но требовал большого количества электроэнергии.

Поэтому свое первое производство Эру организовал на металлургическом заводе в Нейгаузене (Швейцария), рядом со знаменитым Рейнским водопадом, сила падающей воды которого приводила в действие динамо-машины предприятия.

18 ноября 1888 г., между Швейцарским металлургическим обществом и немецким промышленником Ратенау было подписано соглашение об учреждении в Нейгаузене Акционерного общества алюминиевой промышленности с общим капиталом в 10 миллионов швейцарских франков. Позднее его переименовали в Общество алюминиевых заводов. На его торговой марке было изображено солнце, восходящее из-за алюминиевого слитка, что должно было, по замыслу Ратенау, символизировать зарождение алюминиевой промышленности. За пять лет производительность завода возросла более чем в 10 раз. Если в 1890 г. в Нейгаузене было выплавлено всего 40 т алюминия, то в 1895 г. — 450 т.

Чарльз Холл, воспользовавшись поддержкой друзей, организовал Питтсбургскую восстановительную компанию, которая запустила свой первый завод в Кенсингтоне неподалеку от Питтсбурга 18 сентября 1888 г. В первые месяцы он выпускал лишь около 20–25 кг алюминия в сутки, а в 1890-м — уже по 240 кг ежедневно.

Свои новые заводы компания расположила в штате Нью-Йорк, вблизи новой Ниагарской гидроэлектростанции. Алюминиевые заводы и в наше время строятся в непосредственной близости от мощных, дешевых и экологичных источников энергии, таких как ГЭС. В 1907 г. Питтсбургская восстановительная компания была реорганизована в Американскую алюминиевую компанию или сокращенно Alcoa.

В 1889 г. технологичный и дешевый метод производства глинозема — оксида алюминия, основного сырья для производства металла — изобрел австрийский химик Карл Иосиф Байер, работая в Санкт-Петербурге (Россия) на Тентелевском заводе. В одном из экспериментов ученый добавил в щелочной раствор боксит и нагрел в закрытом сосуде — боксит растворился, но не полностью. В нерастворившемся остатке Байер не обнаружил алюминия — оказалось, что при обработке щелочным раствором весь алюминий, содержащийся в боксите, переходит в раствор. Методы Байера и Холла — Эру лежат в основе современных технологий получения алюминия.

Таким образом, за несколько десятилетий была создана алюминиевая промышленность, завершилась история о «серебре из глины» и алюминий стал новым промышленным металлом.

Третий цикл — широкое применение алюминия

На рубеже XIX и XX вв. алюминий стал применяться в самых разных сферах и дал толчок для развития целых отраслей.

В 1891 г. по заказу Альфреда Нобеля в Швейцарии создается первый пассажирский катер Le Migron с алюминиевым корпусом. А через три года шотландская судостроительная верфь Yarrow & Co представила изготовленную из алюминия 58-метровую торпедную лодку. Этот катер назывался «Сокол», был сделан для военно-морского флота Российской империи и развивал рекордную для того времени скорость в 32 узла.

В 1894 г. американская железнодорожная компания New York, New Haven, and Hartford Railroad, принадлежавшая тогда банкиру Джону Пирпонту Моргану (J. P. Morgan), начала выпускать специальные легкие пассажирские вагоны, сидения которых были выполнены из алюминия. А всего через 5 лет на выставке в Берлине Карл Бенц представил первый спортивный автомобиль с алюминиевым корпусом.

Но настоящую революцию алюминий совершил в авиации, за что навсегда заслужил свое второе имя — «крылатый металл». В этот период изобретатели и авиаторы во всем мире работали над созданием управляемых летательных аппаратов — самолетов.

17 декабря 1903 г. американские авиаконструкторы братья Уилбур и Орвилл Райт впервые в истории человечества совершили полет на управляемом летательном аппарате «Флайер-1». Для того чтобы заставить его полететь, они попытались использовать автомобильный

двигатель, однако он оказался слишком тяжелым. Поэтому специально для «Флайера-1» разработали полностью новый двигатель, детали которого были изготовлены из алюминия. Легкий 13-сильный мотор поднял первый в мире самолет с Орвиллом Райтом за штурвалом в воздух на 12 секунд, за которые он пролетел 36,5 метров. Братья совершили еще два полета по 52 и 60 метров на высоте около 3 метров от уровня земли.

Мир входил в период войн, в которых авиация стала играть стратегическую, а иногда решающую роль. Поэтому дюралюминий первое время являлся военной технологией, и метод его получения держался в секрете.

Тем временем алюминий осваивал новые и новые сферы применения. Из него начали массово производить посуду, которая быстро и почти полностью вытеснила медную и чугунную утварь. Алюминиевые сковородки и кастрюли легкие, быстро нагреваются и остывают, а также не ржавеют.

В 1907 г. в Швейцарии Роберт Виктор Неер изобретает способ получения алюминиевой фольги методом непрерывной прокатки алюминия. В 1910 г. он уже запускает первый в мире фольгопрокатный завод. А еще через год компания Tobler использует фольгу для упаковки шоколада. В нее, в том числе, заворачивают и знаменитый треугольный Toblerone.

Очередной переломный момент для алюминиевой промышленности наступает в 1920 г., когда группа ученых под руководством норвежца Карла Вильгельма Содерберга изобретает новую технологию производства алюминия, которая существенно удешевляла метод Холла — Эру. До этого в качестве анодов при электролизе использовались предварительно обожженные угольные блоки — они быстро расходовались, поэтому постоянно требовалась установка новых. Содерберг решил эту проблему с помощью постоянно возобновляемого электрода. Он формируется в специальной восстановительной камере из коксосоляной пасты и по мере необходимости добавляется в верхнее отверстие электролизной ванны.

Технология Содерберга быстро распространяется по всему миру и приводит к увеличению объемов выпуска алюминия. Именно ее берет на вооружение СССР, не имевший тогда собственной алюминиевой промышленности. В дальнейшем развитие технологий вновь сделало применение электролизеров с обожженными анодами предпочтительнее из-за отсутствия на них выбросов смолистых веществ и меньшего расхода электроэнергии. Кроме того, одним из основных достоинств электролизеров с обожженными анодами является возможность увеличения силы тока, то есть производительности.

Еще в 1914 г. российский химик Николай Пушкин писал: «Россия, потребляющая ежегодно 80 000 пудов алюминия, сама не производит ни одного грамма этого металла, и весь алюминий покупает за границей».

В это время алюминий активно использовался в авиации, судостроении и автомобилестроении, а также начинал свой путь в строительстве. В США в 1931 г. был построен знаменитый небоскреб Empire State Building, вплоть до 1970 г. являвшийся самым высоким зданием в мире. Это было первое здание, при строительстве которого широко использовался алюминий, как в основных конструкциях, так и в интерьере.

Вторая мировая война видоизменила основные рынки спроса на алюминий — на первый план выходит авиация, изготовление танковых и автомобильных моторов. Война подтолкнула страны антигитлеровской коалиции к увеличению объема алюминиевых мощностей, совершенствовалась конструкция самолетов, а вместе с ними и виды новых алюминиевых сплавов. «Дайте мне 30 тысяч тонн алюминия, и я выиграю войну», — писал в 1941 г. президенту США Франклину Рузвельту глава СССР Иосиф Сталин. С окончанием войны заводы переориентировались на гражданскую продукцию.

В середине XX в. человек шагнул в космос. Чтобы сделать это, вновь понадобился алюминий, для которого аэрокосмическая отрасль с тех пор стала одной из ключевых сфер применения. В 1957 г. СССР вывел на орбиту Земли первый в истории человечества искусственный спутник — его корпус состоял из алюминиево-магниевого сплава. Все последующие космические аппараты изготавливались из крылатого металла.

В 1958 г. в США появился алюминиевый продукт, ставший впоследствии одним из самых массовых товаров из алюминия, символом экологичности этого металла и даже культовым предметом в области искусства и дизайна. Это алюминиевая банка. Ее изобретение делят между собой алюминиевая компания Kaiser Aluminum и пивоваренная Coors. К слову, пивоваренная компания не только первой стала продавать пиво в алюминиевых банках, но и организовала систему сбора и переработки использованных банок. В 1967 г. разливать свои напитки в алюминиевые банки начинают Coca-Cola и Pepsi.

Спустя два года в Японии был запущен знаменитый Shinkansen — первый в мире высокоскоростной поезд, прообраз всех современных поездов такого типа, в которых алюминий является ключевым материалом. Он курсировал между Токио и Осакой и преодолевал расстояние в 515 км за 3 часа 10 минут, разгоняясь до 210 км/ч.

Тем временем первенство на мировом алюминиевом рынке переходит к СССР, где ударными темпами вводятся в строй новые мощные гидроэлектростанции и алюминиевые заводы на территории Сибири. В середине 1960-х гг. там запущены два гиганта алюминиевой индустрии — Братский и Красноярский алюминиевые заводы мощностью по 1 млн т металла в год каждый. До сих пор эти предприятия являются крупнейшими в мире.

В 1970-х гг. возросшие объемы производства алюминия в мире и спрос приводят к тому, что этот металл становится биржевым товаром. Торги алюминиевыми контрактами в 1978 г. начинаются на Лондонской бирже металлов (LME) — старейшей в мире бирже, образованной в 1877 г.

Производство алюминия неуклонно растет по всему миру и к началу 1990-х гг. достигает отметки в 19 млн т. К этому моменту на глобальной экономической карте начинает возрастать роль Китая, на территорию которого постепенно начинает смещаться центр мирового производства. Выпуск собственного алюминия на тот момент в Китае не превышает и 900 тыс. т в год, но начинает быстро расти, обеспечивая внутренние нужды. В России алюминиевые мощности достигли уровня в 3,5 млн т ежегодно, но страна пережила распад СССР, развал экономики и вошла в фазу смены экономической модели, поэтому рост производства алюминия остановился.

Китай обогнал Россию в 2002 г., по итогам которого его производство превысило 4,3 млн т. В мире на тот момент было произведено 26 млн т алюминия. В дальнейшем алюминиевое производство в Китае росло опережающими темпами — всего через четыре года, в 2006, оно достигло почти 10 млн т, что составляло треть общемировых объемов. Страна обогнала все остальные регионы мира по выпуску крылатого металла.

Весь производимый алюминий Китай использует для собственных нужд. Оборот металла и других материалов настолько велик, что в Китае создаются собственные товарные биржи, которые в 1999 г. объединяются в Шанхайскую фьючерсную биржу (SHFE). Более 90% электроэнергии, которая используется для производства алюминия в Китае, вырабатывается на угольных электростанциях. Для сравнения, в России — обратная ситуация, и около 90% алюминиевого производства обеспечивается гидроэлектроэнергетикой.

Существенную роль в алюминиевой отрасли начинают играть и страны Ближнего Востока. Имея доступ к дешевой нефти и природному газу, получаемому попутно, алюминиевые производители обеспечены источником дешевой, но неэкологичной, электроэнергии. Они также активно наращивают свое производство и сегодня входят в число мировых лидеров по производству крылатого металла.

Испытания для мировой алюминиевой отрасли начались в 2008 г. вместе с глобальным финансово-экономическим кризисом. Тогда в результате обвала рынков алюминиевая отрасль впервые в истории столкнулась с кризисом перепроизводства и, как следствие, обрушением на 50% цен на металл. На складах по всему миру скопились миллионы тонн алюминия, интерес к которым проявили биржевые трейдеры: финансовые сделки с металлом стали выгодной инвестицией.

Кризис 2008–2009 гг. привел к масштабным закрытиям алюминиевых заводов практически всех западных алюминиевых компаний. Вместе с тем, производство металла в мире продолжило расти. Производители Китая и Ближнего Востока двигались в противоположном направлении и наращивали производство.

В 2013 г. мировая алюминиевая промышленность преодолела новый рубеж — производство металла превысило 50 млн т.

Эволюция технологий производства алюминия

Каждый цикл обусловлен определенным этапом, который дает новый толчок к развитию технологий. Последовательное прохождение всех этапов приводит к завершению цикла развития отрасли, после чего цикл повторяется.

Ресурсоэффективность в рамках исторического развития отраслей промышленности рассматривается как важнейший фундаментальный концепт перехода технологического развития на новый уровень. При этом метод исследования сосредоточен на изучении реакции отрасли как целого на изменяющиеся условия, без подробного описания механизма работы и внутреннего устройства той или иной технологии, так как в рамках поставленной задачи это не является первостепенным объектом изучения (рис. 9.2).

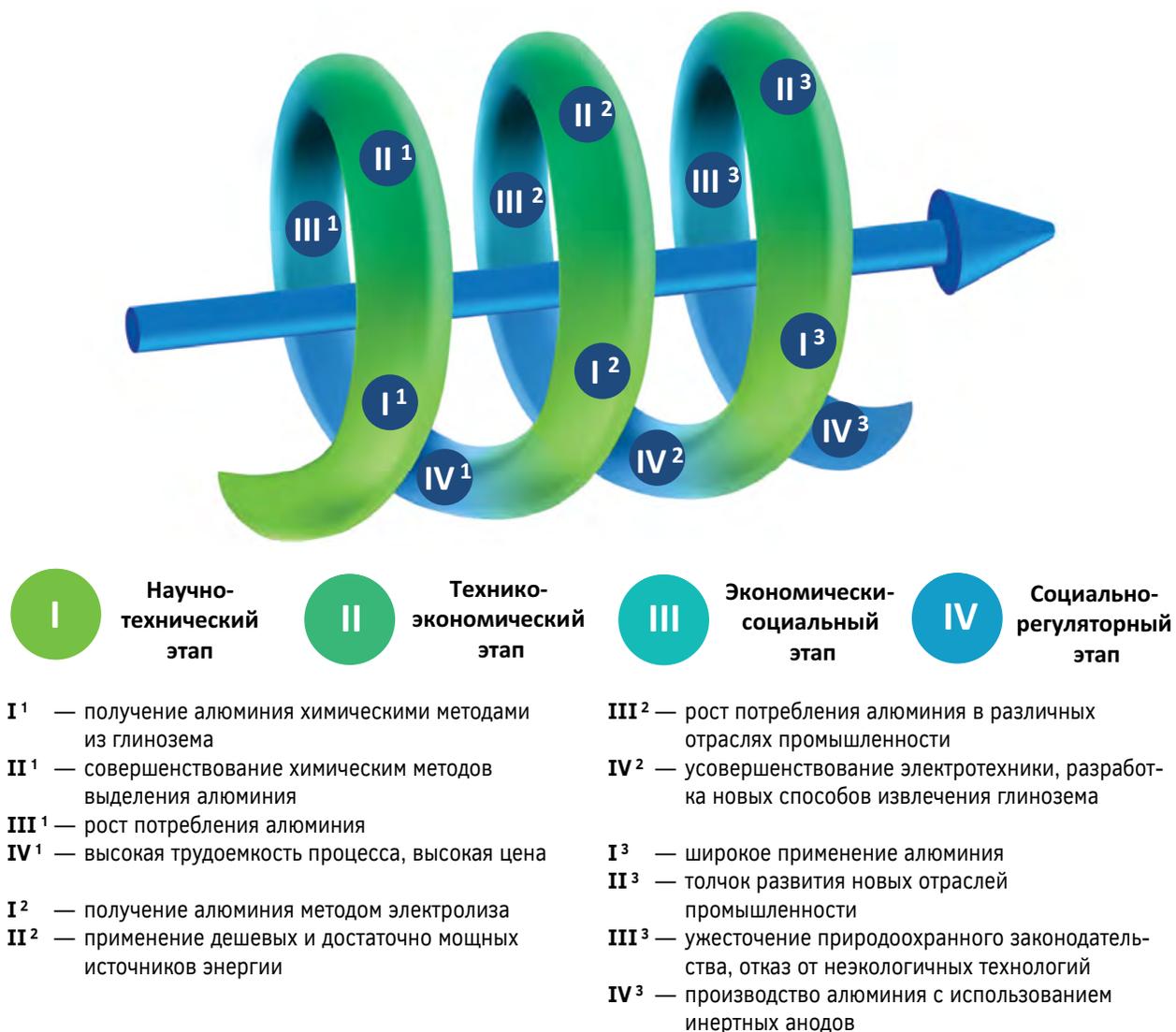


Рис. 9.2. Эволюция технологий производства алюминия

ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ АЛЮМИНИЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Производство глинозема

Способы производства глинозема из различных видов сырья (минералов), содержащего алюминий, основаны на получении алюминатных растворов и их свойстве самопроизвольно разлагаться при снижении температуры и концентрации на гидроксид алюминия и щелочь. Прокаливая гидроксид алюминия при температуре 1000–1200°С, получают глинозем.

Наиболее широкое применение в промышленности нашел разработанный Байером щелочной гидрохимический способ, с помощью которого, как правило, перерабатывают лишь высокосортные бокситы с малым содержанием кремнезема — бокситы с кремниевым модулем (соотношение Al_2O_3 и SiO_2 по массе) выше 6. После подготовки сырья (дробление и размол боксита) осуществляют его обработку щелочно-алюминатным раствором — процесс выщелачивания, в результате которого из боксита извлекается оксид алюминия, переходящий в раствор с концентрацией Al_2O_3 250–300 г/л. При этом в осадок выпадают нерастворимые соединения, содержащиеся в боксите, — так называемый красный шлам. Последующие процессы производства связаны с отделением и очисткой алюминатного раствора от красного шлама и промывкой последнего для более полного извлечения алюминатного раствора.

Таблица 9.4. Основные этапы производства глинозема способом Байер-спекания

Входной поток	Этап процесса (подпроцесс)	Выходной поток	Основное технологическое оборудование	Эмиссии
Боксит, известняк, вода, сода	Подготовка шихты к выщелачиванию и спеканию	Влажная шихта (пульпа)	Дробилки, шаровые мельницы	Пыль
Пульпа	Выщелачивание	Алюминатный раствор, шлам	Автоклавные батареи	Щелочь
Шлам	Сгущение и промывка шлама ветвей Байера и спекания (раздельно)	Шлам в отвал	Сгустители, фильтры	Щелочь, шлам
Пульпа	Спекание	Спек	Вращающиеся печи	Пыль, SO_2 , NO_x , CO
Спек	Переработка спека	Алюминатный раствор, шлам (красный)	Дробилки, мельницы	Пыль, щелочь
Алюминатный раствор	Переработка алюминатных растворов (раздельно для каждой ветви)	Очищенный алюминатный раствор (оборотный), гидроксид алюминия	Декомпозиеры, сгустители	Щелочь
Гидроксид алюминия	Кальцинация	Глинозем	Печи	Пыль, SO_2 , NO_x , CO

Бокситы с кремниевым модулем ниже 6 и другие виды высококремнистого сырья, пригодного для производства глинозема (нефелины, алуниты, каолины), перерабатывают или по способу спекания, или комбинированному способу — сочетание способа Байера со способом спекания.

Способ спекания основан на термической обработке смеси алюмосиликатной руды с известняком с целью перевода практически всего оксида алюминия из сырья в растворимую форму в спеке (алюминат натрия) и связывания диоксида кремния сырья в нерастворимую форму (двукальциевый силикат).

Таблица 9.5. Основные этапы производства глинозема способом спекания нефелинов

Входной поток	Этап процесса (подпроцесс)	Выходной поток	Основное технологическое оборудование	Эмиссии
Нефелин, известняк, вода	Приготовление шихты	Влажная шихта (пульпа)	Дробилки, мельницы	Пыль
Пульпа	Спекание	Спек	Вращающиеся печи	Пыль, SO ₂ , NO _x , CO
Спек	Переработка спека	Алюминатный раствор, шлам	Дробилки, мельницы	Пыль, щелочь, шлам
Алюминатный раствор	Переработка алюминатных растворов	Гидроксид алюминия, содовые растворы	Карбонизаторы, декомпозиеры, сгустители, автоклавы, фильтры	Щелочь, SO ₂ , NO _x , CO
Гидроксид алюминия	Кальцинация	Глинозем	Печи	Пыль, SO ₂ , NO _x , CO

Способ Байера — самый экономичный, но его применение ограничивается качеством и количеством боксита; способ спекания является наиболее затратным, но более универсальным и пригоден для любого вида сырья.

На действующих российских предприятиях, выпускающих глинозем, применяются все из перечисленных технологий. На Ачинском глиноземном комбинате и Пикалевском глиноземной заводе («Базэл Цемент Пикалево») перерабатывается нефелиновое сырье. Технология производства глинозема, основанная на спекании нефелина с известняком, предусматривает комплексную переработку сырья на глинозем, соду и цемент.

Шлам, получаемый при выщелачивании спека (нефелиновый шлам), используют для получения цементного клинкера.

Богословский и Уральский алюминиевые заводы перерабатывают отечественные байеровские и спекательные бокситы. Производство глинозема осуществляется по комбинированному способу — параллельная схема Байер-спекания. По способу Байера получают около 80–90% глинозема, остальное — по технологии спекания. Ветвь спекания состоит из отделений приготовления шихты (дополнительного к ветви Байера), спекания, размола, выщелачивания спека и отделения алюминатного раствора от осадка шлама. Получаемый в этой ветви алюминатный раствор объединяется с алюминатным раствором из ветви Байера, а усредненный раствор поступает на последующую переработку, включая стадию прокалики гидроксида алюминия в печах кальцинации.

Производство анодной массы и анодов

В зависимости от типа используемого электролизера в качестве анодных материалов используется анодная масса или предварительно обожженные аноды.

Анодные материалы являются одним из ключевых элементов в технологии электролитического производства алюминия. Угольные аноды или анодную массу для получения первичного алюминия, как правило, производят на том же алюминиевом заводе, что и сам металл. Хотя в некоторых случаях их могут производить на отдельных анодных фабриках.

Сырьем для производства анодной массы и анодов служат каменноугольный пек (связующий материал) и нефтяной кокс с низким содержанием зольных примесей (наполнитель).

Производство анодной массы. В табл. 9.6 представлено описание основных этапов технологического процесса получения анодной массы.

Исходный сырой кокс поступает на склад предприятия и по транспортной системе подается на первичное дробление. Далее через систему питания кокс подается в прокалочный агрегат, после которого по системе транспорта прокаленный кокс поступает в бункер запаса. Некоторые предприятия, не имея в своем составе прокалочных печей, осуществляют закупку уже прокаленного кокса. На сушку кокс поступает из бункера прокаленного кокса, затем на дробление и рассев, после чего полученные сортовые фракции прокаленного кокса подогреваются и направляются в смеситель, где происходит смешение кокса с пеком.

Пек поступает на предприятие в жидком и (или) твердом виде и после подготовки с помощью дозатора и пекового насоса подается в смеситель. После смесителя через орошаемый водой конвейер и систему транспорта охлажденные брикеты анодной массы поступают на склад готовой продукции.

Таблица 9.6. Основные этапы технологического процесса получения анодной массы

Входной поток	Этап процесса (подпроцесс)	Выходной поток	Основное технологическое оборудование	Эмиссии
Кокс нефтяной сырой	Прием, хранение, предварительное дробление	Кокс нефтяной сырой дробленый	Двухвалковая зубчатая дробилка	Пыль кокса
Кокс нефтяной сырой дробленый	Прокалка	Кокс нефтяной прокаленный	Вращающаяся прокалочная печь барабанного типа	Пыль кокса, CO, SO ₂ , NO _x
Кокс нефтяной прокаленный	Дробление, размол, рассев на фракции	Сортовые фракции прокаленного кокса	Дробилка молотковая однороторная. Дробилка двухвалковая. Грохот универсальный. Шаровые барабанные мельницы	Пыль кокса
Сырой прокаленный кокс	Сушка	Сухой прокаленный кокс	Сушильный агрегат	Пыль кокса, CO, SO ₂ , NO _x
Пек гранулированный каменноугольный	Прием, хранение, пекоподготовка	Пек жидкий	Пекоприемники	Пыль пека, возгоны пека
Пек жидкий каменноугольный	Прием, хранение, пекоподготовка	Пек жидкий	Пекоприемники Пекоплавители	Возгоны пека
Сортовые фракции прокаленного кокса, пек жидкий	Дозирование, смешение, формование	Брикеты анодной массы	Весовые дозаторы. Смесители. Формовочное устройство	Пыль кокса, возгоны пека

Количество и качество связующего пека являются фактором, определяющим выделение в атмосферу загрязняющих веществ (ЗВ). Улавливаемая в системах аспирации и пылеочистки пыль от переделов производства анодной массы возвращается в производство.

Изложенные принципы производства анодной массы не меняются уже много десятилетий. Однако аппаратное оформление, качество оборудования и принципы управления технологическим процессом постоянно совершенствуются.

Производство анодной массы является подчиненным к производству алюминия и осуществляется практически на всех алюминиевых заводах, применяющих технологию электролиза с самообжигающимися анодами (Содерберга).

Производство анодов. В табл. 9.7 приведены основные технологические этапы производства обожженных анодов.

Процесс производства анодов в части дробления, измельчения и смешивания сырьевых материалов идентичен производству анодной массы, за исключением использования отходов обожженных анодов (огарки), которые вместе с коксом проходят стадии дробления и отсева. Затем из смешанного материала формируются «зеленые» аноды и после охлаждения поступают на склад «зеленых» анодов. Со склада «зеленые» аноды по системе конвейеров направляются в печи обжига. Обжиг осуществляется в многокамерных кольцевых печах открытого типа с подвижной зоной «огня». Печь обжига состоит из блока вертикальных камер, соединенных между собой простенками для последовательного прохода дымовых газов из одной камеры в другую. Эти простенки делят камеры на кассеты, в которые загружаются анодные блоки.

Таблица 9.7. Основные этапы производства обожженных анодов

Входной поток	Этап процесса (подпроцесс)	Выходной поток	Основное технологическое оборудование	Эмиссии
Кокс нефтяной сырой; огарки анодов	Прием, хранение, предварительное дробление	Кокс нефтяной сырой дробленый; огарки анодов дробленые	Двухвалковая зубчатая дробилка	Пыль кокса
Кокс нефтяной прокаленный, дробленые огарки	Дробление, размол, рассев на фракции	Сортовые фракции прокаленного кокса	Дробилка молотковая однороторная. Дробилка двухвалковая. Грохот универсальный. Шаровые барабанные мельницы	Пыль кокса
Пек гранулированный каменноугольный, пек жидкий	Прием, хранение, пекоподготовка	Пек жидкий	Пекоприемники, пекоплавители	Пыль пека, возгоны пека
Сортовые фракции прокаленного кокса и огарков, пек жидкий	Дозирование, смешение	Анодная масса	Весовые дозаторы. Смесители	Пыль кокса, возгоны пека
Анодная масса	Формование	«Зеленые» аноды	Вибропресс	Возгоны пека
«Зеленые» аноды	Обжиг	Обожженные аноды	Многокамерная кольцевая печь открытого типа	Пыль кокса, возгоны пека, HF, CO, SO ₂ , NO _x
Обожженные аноды	Монтаж анодов	Смонтированные аноды	Печи ИЧТ, конвейеры, системы очистки огарков, дробилки	Пыль кокса, в том числе твердые фториды

Продвижение огня производится путем переноса рампы с горелки, дутьевых и отсасывающих труб вдоль печи на одну камеру в соответствии с заданным темпом обжига. В качестве топлива используется мазут. Обожженные анодные блоки по конвейеру поступают на сборку в анодно-монтажное отделение (АМО), которое включает в себя отделение демонтажа и монтажа анодов. При монтаже обожженных анодов осуществляется заливка ниппельных гнезд чугуном, подготовка анододержателя и, как правило, покрытие поверхности анодного блока защитным слоем от интенсивного выгорания поверхностного слоя. При демонтаже огарков анодов в АМО осуществляется их зачистка от электролита, отделение от анододержателя и его зачистка, дробление огарка в дробилках для транспортировки его в заготовительное отделение. В технологическом процессе образуется некоторое количество брака «зеленых» анодов и анодной массы, которые после дробления возвращаются обратно в смеситель. При производстве анодов на специальных установках газоочистки с помощью глинозема из паров абсорбируются смолистые вещества, фториды из анодных огарков. Улавливаемая в системах аспирации и пылеочистки коксовая пыль от переделов производства анодов возвращается в производство.

Производство первичного алюминия

Алюминий производится путем электролитического восстановления оксида алюминия (глинозема), растворенного в расплавленном электролите (криолите) при температуре приблизительно 960°C . В состав электролизера входит углеродный катод, изолированный огнеупорными кирпичами по внутренней поверхности прямоугольного стального кожуха, и углеродные аноды, прикрепленные к электропроводящей анодной балке и погружаемые в раствор. Электролизеры соединены последовательно и образуют серию электролизеров. Постоянный ток подается с анодов через электролит и слой металла на катод, а затем — по комплекту проводников, известных как «ошиновка», на следующий электролизер.

Жидкий алюминий оседает на катоде электролизера. Расплавленный металл периодически извлекается из электролизеров спецковшами и передается в литейное отделение для получения товарной продукции. При электролизе кислород из глинозема реагирует с углеродным анодом и образует диоксид углерода и монооксид углерода. Таким образом, в ходе этого процесса происходит непрерывный расход углеродных анодов.

Основным сырьем для получения алюминия служат: глинозем, фтористые соли (криолит, фтористый алюминий) и обожженные аноды или анодная масса.

Схемы производства алюминия представлена на рис. 9.3.



Рис. 9.3. Схема производства первичного алюминия

В табл. 9.8 приведена информация об электролизе.

Таблица 9.8. Описание электролиза

Входной поток	Этап процесса	Выходной поток	Основное технологическое оборудование	Эмиссии
Свежий глинозем, фторсоли	Прием, хранение сырья на складах и в силосах	Свежий глинозем, анодная масса/ аноды, фторсоли	Склады, силоса, бункера	В атмосферный воздух: оксид алюминия; твердые фториды
Сырье: глинозем, анодная масса/ аноды, фторсоли. Электроэнергия	Электролитическое производство первичного алюминия	Первичный алюминий (алюминий-сырец)	Электролизеры: с самообжигающимися анодами и верхним токоподводом (Содерберга); с самообжигающимися анодами и боковым токоподводом (Содерберга); с предварительно обожженными анодами	В атмосферный воздух: фтористый водород; твердые фториды; диоксид серы; оксид углерода; пыль неорганическая; смолистые вещества (для электролизеров Содерберга). В поверхностные и подземные воды — отсутствуют. В почву — непосредственно отсутствуют. Отходы производства: отработанная угольная футеровка; отработанная кирпичная футеровка; угольная пена; огарки обожженных анодов. Прочее: физические воздействия (тепловое, шум, вибрация, электромагнитное загрязнение) не являются лимитирующими для производства первичного алюминия

Виды электролизеров и технологий электролиза

Промышленное получение алюминия как в России, так и во всем мире осуществляется в электролизерах, различающихся по конструкции и единичной мощности. В настоящее время применяются следующие технологии электролиза:

- технология производства алюминия на электролизерах с предварительно обожженными анодами (технология электролиза ОА);
- технология производства алюминия на электролизерах с самообжигающимися анодами (или электролизеры с анодом Содерберга).

Электролизеры с самообжигающимися анодами различаются также по принципу подвода тока к аноду, с боковым и верхним токоподводом (технологии электролиза БТ и ВТ соответственно).

На электролизерах ВТ токоподводящие штыри устанавливают вертикально на высоту, обеспечивающую их запекание при опускании анодного массива. При достижении нижним концом штыря расстояния от подошвы анода, определяемого безопасным ведением процесса (минимальное расстояние от штыря до подошвы анода — не менее 20 см), штырь раскручивается и извлекается из тела анода.

Катодное устройство электролизера ВТ состоит из стального кожуха, футерованного внутри угольными подовыми блоками и боковыми плитами, огнеупорными и теплоизоляционными материалами. В нижнюю часть подовых блоков перед их установкой в электролизер устанавливаются стальные стержни (блюмсы), которые заливают чугуном. Блюмсы служат

для отвода тока от подины. Швы между подовыми блоками и периферийный шов набивают подовой массой.

Анодное устройство электролизера ВТ состоит из угольного анода, помещенного в стальной кожух, анодной шины и анодных штырей, служащих для подвески анода и подвода тока. В нижней части анодного кожуха по его периметру на специальном поясе подвешен газосборный колокол, собранный из чугунных литых секций. Колокол подвешивается на уголок (пояс) анодного кожуха и служит газосборником, собирающим из-под анода смесь газов. На рисунке представлена конструкция электролизера ВТ.

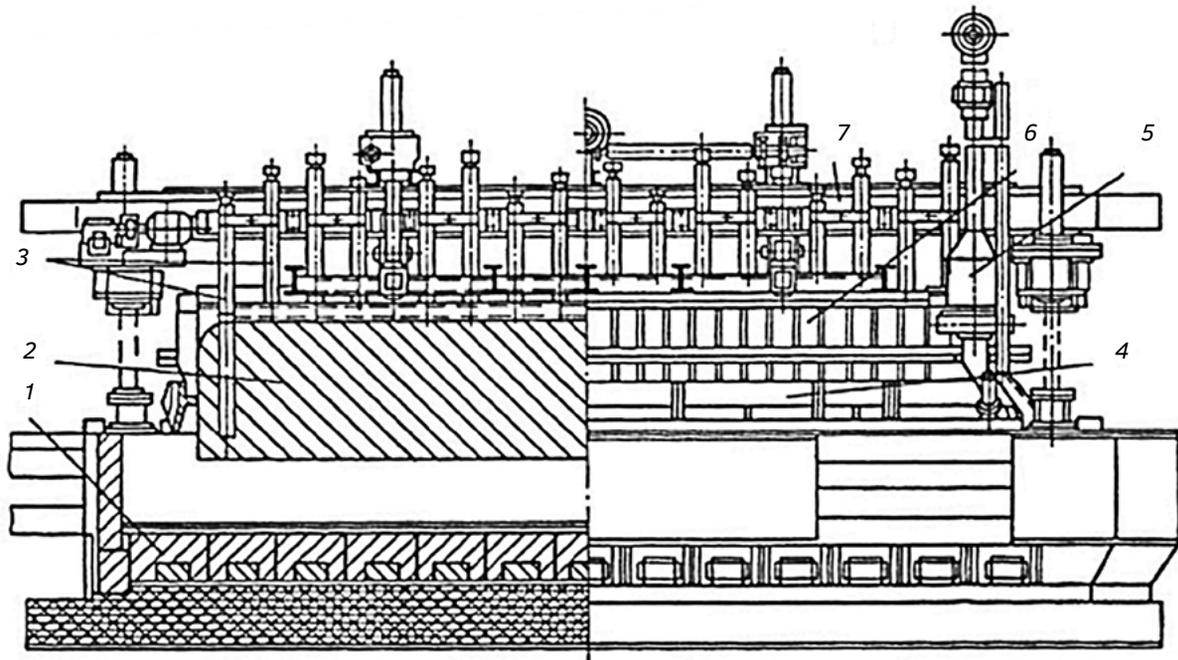


Рис. 9.4. Электролизер ВТ:

- 1 — катодные угольные блоки; 2 — анодный массив; 3 — анодный токоведущий штырь;
4 — колокольный газосборник; 5 — горелочное устройство; 6 — анодный кожух;
7 — анодная шина

На электролизерах ВТ анодные газы эвакуируются с помощью системы колокольного газосборника и горелочного устройства. Колокольный газосборник, собранный из чугунных секций, крепится к пояску анодного кожуха и герметизируется в нижней части засыпкой глинозема. Анодные газы собираются под газосборником и под избыточным давлением поступают в горелочные устройства (для дожигания оксида углерода и смолистых веществ).

Разработкой новой конструкции электролизеров ВТ является проект «Создание экологически приемлемой и конкурентно способной технологии электролиза с анодом Содерберг» (проект «ЭкоСодерберг»). Проект «ЭкоСодерберг» включил практически весь комплекс работ, связанных с производством алюминия, а именно:

- технологию и оборудование по производству анодной массы;
- технологию изготовления и конструкцию катодного узла;
- технологию анода и электролиза с современной автоматизированной системой управления системой;
- комплекс мероприятий по дожигу и удалению газов от электролизера;
- автоматизированные системы по транспортировке и питанию электролизера сырьем;
- механизмы, устройства и инструменты, исключаяющие или снижающие долю ручного труда в обслуживании электролизера.

К новым техническим и технологическим решениям конструкции электролизера «ЭкоСодерберг» относятся:

- устройство электролизеров С8БМ(Э) и С8Б(Э) с новым безгорелочным газосборным колоколом и новой системой газоудаления;
- новый технологический инструмент, средства механизации, новые технологические практики для обслуживания данных электролизеров;
- технология производства и использования анодной массы с низким содержанием связующего.

На рис. 9.5 представлена система газоудаления электролизера «ЭкоСодерберг».

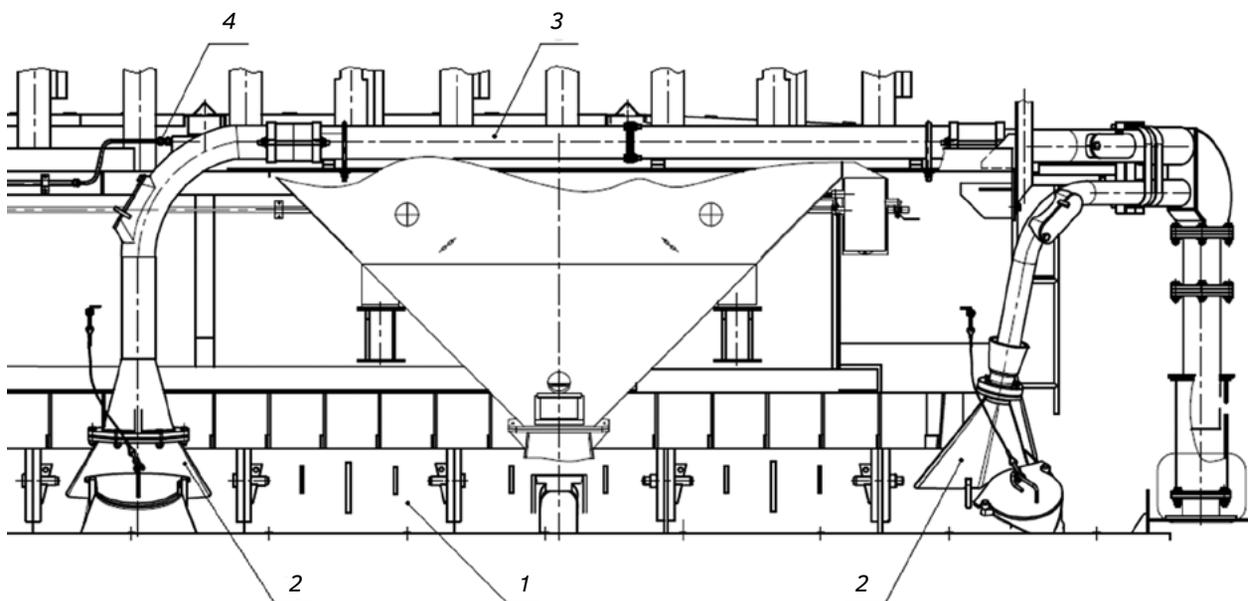


Рис. 9.5. Система газоудаления электролизера «ЭкоСодерберг»:

- 1 — газосборный колокол электролизера; 2 — сборные купола системы газоудаления;
3 — трубопроводы системы удаления газов; 4 — продувка системы удаления газов

На электролизерах БТ конструкция катодного устройства такая же, как у стандартного (рядового) электролизера ВТ.

Анодное устройство электролизера БТ состоит из стальной анодной рамы, которая с помощью стальных канатов и системы полиспасов подвешивается на металлоконструкции. По мере сгорания анода и его опускания для поддержания установленного межэлектродного расстояния одновременно с ним опускается анодная рама. Токоведущими являются два нижних ряда штырей. Они подключаются к анодной ошиновке с помощью медных или (чаще) алюминиевых спусков. Стальные токоведущие анодные штыри забиваются под определенным углом в боковые поверхности анодного массива в верхних зонах, где еще не прошли процессы спекания анода, и по мере сгорания анода перемещаются вместе с анодом в нижние, более горячие зоны, где спекаются со скоксовавшимся массивом и при достижении определенных температур воспринимают токовую нагрузку. Когда становится вероятным выход нижнего конца штыря из тела анода и контакт с электролитом, штырь извлекается из тела анода и забивается в верхний горизонт. Электролизеры БТ снабжены укрытием для сбора вредных веществ, выделяющихся при электролизе. Укрытие монтируется на каркасе и имеет сверху газосборный колпак и шторы (навивные, створчатые и др.), закрывающие боковые стороны электролизера.

По-разному осуществляется и эвакуация анодных газов, образующихся при электролизе на электролизерах разных типов. На электролизерах БТ все устройство, ограниченное коркой электролита и боковыми поверхностями анода, перекрыто шторными укрытиями.

Анодные газы, содержащие горючий оксид углерода, выделяются через специально устраиваемые отверстия в корке электролита «огоньки». При этом горючие компоненты анодного газа сгорают, а продукты горения удаляются с отсасываемой от электролизера газовой воздушной смесью.

На рис. 9.6 представлена конструкция электролизера БТ.

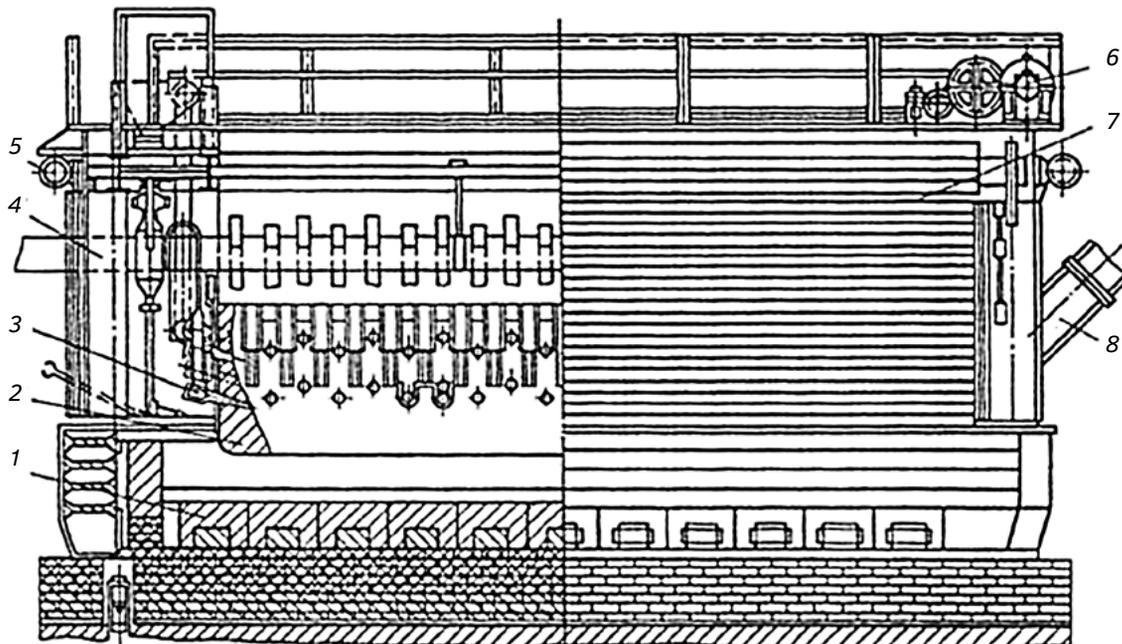


Рис. 9.6. Электролизер БТ:

- 1 — катодные угольные блоки; 2 — анодный массив; 3 — анодный токоведущий штырь;
4 — анодная шина; 5 — механизм подъема штор; 6 — механизм перемещения анода;
7 — шторное укрытие; 8 — патрубок отсоса газов

Электролизеры ОА отличаются от рассмотренных выше электролизеров ВТ и БТ конструкцией анодного устройства. Обычно электролизеры ОА имеют многоблочный анодный массив. Число анодных блоков зависит от их размеров.

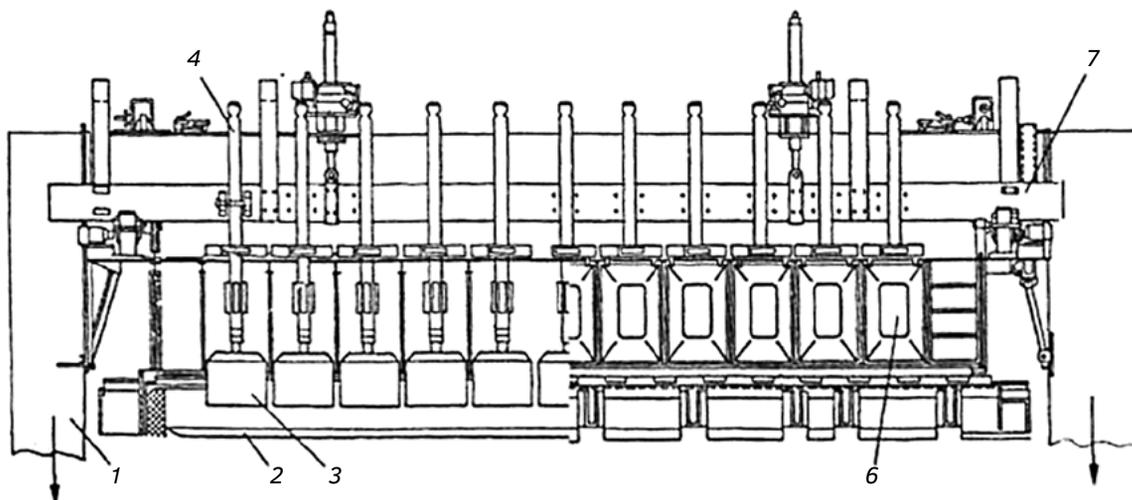


Рис. 9.7. Электролизер ОА:

- 1 — анодная шина; 2 — катодное устройство; 3 — ОА;
4 — анодные штанги; 5 — анодная рама; 6 — створки укрытия

Анодами служат формированные и прессованные угольные блоки, обожженные в печах при конечной температуре 1100–1200°С. После обжига анодов в них монтируются анододержатели, в комплекте с которыми они поставляются в корпус электролиза. Аноды присоединяются к анодным шинам с помощью анододержателей, алюминиевая штанга которых прижимается специальным зажимом к шине, а стальная (ниппели) закрепляется в ниппельных гнездах блока с помощью чугунной заливки. Для перемещения анодного массива на электролизере имеется подъемный механизм. Укрытие электролизера ОА предназначено для сбора и удаления образующихся вредных веществ. Газы направляются на улавливание ценных компонентов и регенерацию фторсолей. На рис. 9.7 представлена конструкция электролизера ОА.

СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ

Для сравнения технологий производства алюминия по технологическим циклам необходимо определить показатели, пригодные для сравнения согласно соответствующим условиям:

- актуальность на протяжении всех технологических циклов развития алюминиевой промышленности;
- наличие сопоставимых статистических данных за рассматриваемый период.

В качестве наиболее распространенных критериев, характеризующих промышленность, можно выделить: ресурсоемкость, энергоемкость, экологичность, трудоемкость. Критерий ресурсоемкости и экологичности не пригоден для сравнения технологий производства алюминия на всех технологических циклах, так как в течение развития алюминиевой промышленности происходило изменение используемых ресурсов и данные не отражены статистическими данными. Сравнение технологий различных технологических циклов развития алюминиевой промышленности производилось по двум критериям: чистота получаемого алюминия и расход электроэнергии на получение алюминия.

На рис. 9.8 представлены объемы производства алюминия, циклы развития алюминиевой промышленности и выбранные критерии для сравнения (чистота получаемого алюминия и расход электроэнергии на получение алюминия).

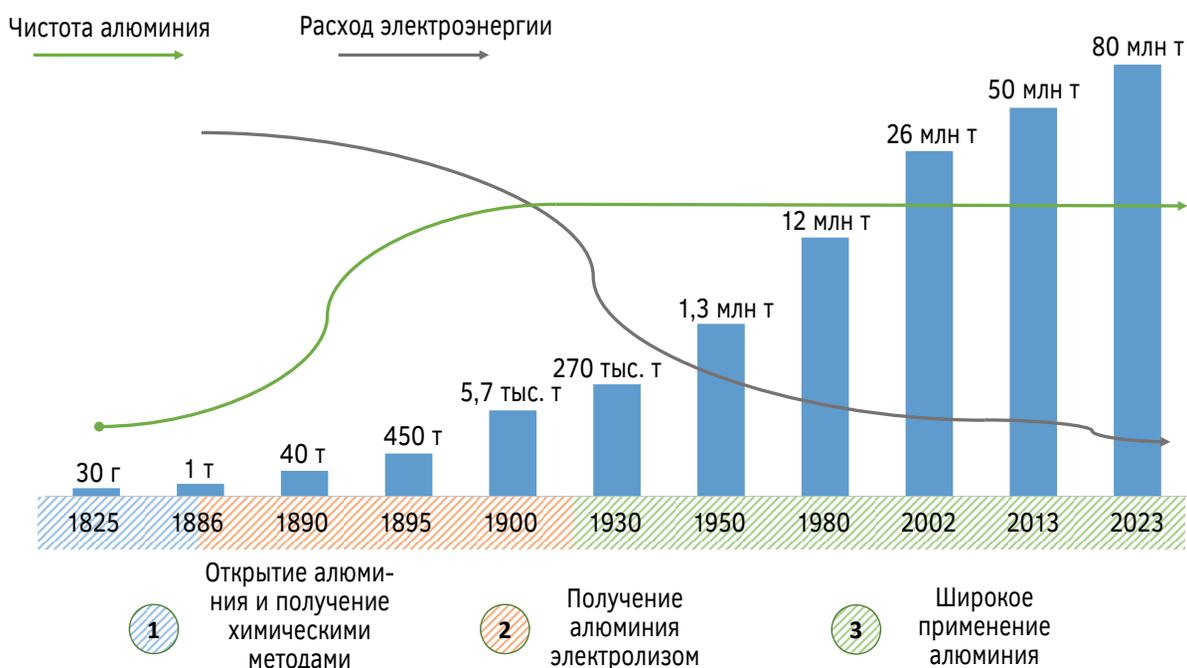


Рис. 9.8. График исторического развития алюминиевой промышленности

Сравнение применяемых технологий производства алюминия

Производство глинозема. Расход сырья на 1 т глинозема и, как следствие, количество выбросов, сбросов и образующихся отходов зависят от применяемой технологии производства и являются основными показателями при производстве глинозема.

Удельные уровни потребления сырьевых материалов (топлива, воды и электроэнергии) минимальны для процесса Байера и максимальны для технологии переработки нефелинов на глинозем. В табл. 9.9 представлены достигнутые удельные расходные показатели по сырью, потребляемому в производстве.

Таблица 9.9. Расход сырья, материалов и энергоресурсов

Наименование	Единица измерения	Расход на 1 т глинозема	
		Байер-спекание (параллельный вариант)	Переработка нефелинов
Боксит	т	2,54–2,74	—
Нефелин	т	—	4,0–5,0
Тепловая энергия	Гкал	2,90–4,0	1,25–1,35
Электроэнергия	тыс. кВт·ч	0,35–0,40	1,0–1,1

Производство глинозема из нефелинов требует наиболее высоких расходов сырья и энергоресурсов. Его применение в Российской Федерации вызвано отсутствием запасов качественных отечественных бокситов и целесообразно только при наличии дешевой электроэнергии и топлива, низких транспортных расходов на перевозку сырья и готового продукта и при условии комплексного использования сырья.

Основными загрязняющими веществами в производстве глинозема являются твердые вещества (технологическая пыль) при сжигании топлива, а также производственные отходы — красный (переработка бокситов) и нефелиновый (переработка нефелинов) шламы. Количество шлама напрямую зависит от качества исходного сырья.

Таблица 9.10. Выбросы пыли в атмосферу и образование отходов при производстве глинозема

Наименование	Единица измерения	Байер-спекание	Спекание нефелинов
Пыль спека (пыль неорганическая с содержанием SiO ₂ ниже 20%)	мг/м ³	200	
Пыль неорганическая с содержанием SiO ₂ ниже 20%	мг/м ³		200
Красный шлам	т/т глинозема	1,52–1,70	
Нефелиновый (белитовый) шлам	т/т глинозема		7,5–8,7

На рис. 9.9 представлен график показателей ресурсо- и энергоэффективности при производстве глинозема.

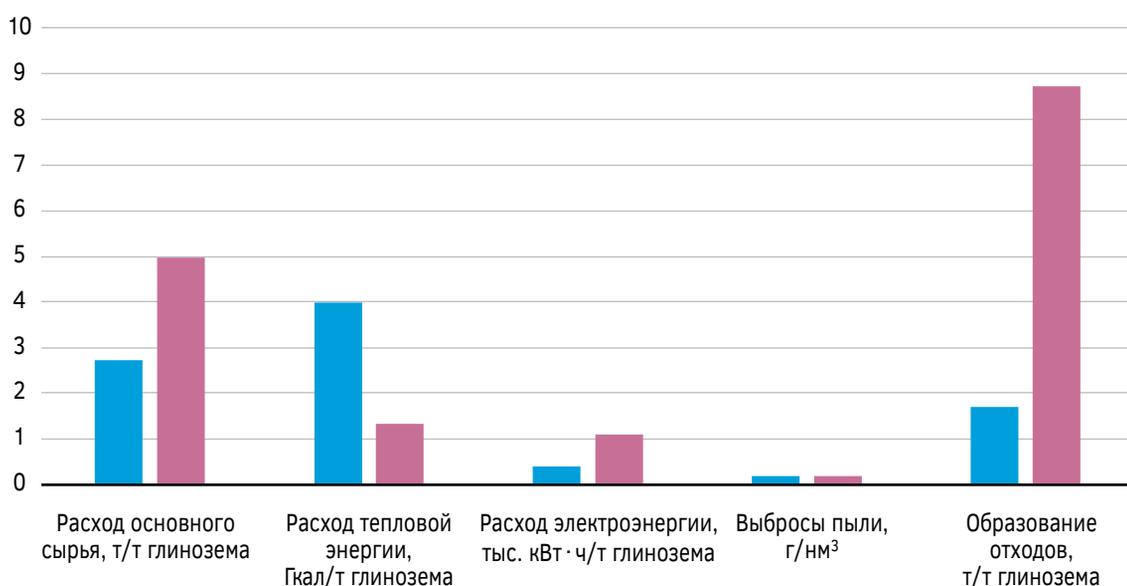


Рис. 9.9. График показателей ресурсо- и энергоэффективности при производстве глинозема

Производство первичного алюминия. Расход сырья, электроэнергии, выбросы пыли и образование отходов являются основными показателями по ресурсо- и энергосбережению при производстве первичного алюминия.

Расход сырья зависит от многих факторов: типа электролизера, состояния технологии, качества сырья, транспортных потерь и т. д.

В табл. 9.11 приведены данные по расходу сырья, материалов и энергоресурсов для разных технологий электролиза.

Таблица 9.11. Расход сырья, материалов и энергоресурсов

Наименование оборудования	Технологические характеристики			
	Расход электроэнергии, кВт·ч/т Al	Расход глинозема, кг/т Al	Расход анодов нетто или анодной массы, кг/т Al	Расход фтор. алюминия, кг/т Al
Электролизеры с самообжигающимися анодами и верхним токоподводом	15216–16111	1920–1939	522–528	21–40
Электролизеры с самообжигающимися анодами и боковым токоподводом	15171–15620	1932–1944	510–515	12,0–21,0
Электролизеры с предварительно обожженными анодами	13158–15126	1917–1938	420–460	12,0–21,0

Расход глинозема практически не зависит от типа электролизеров и определяется в основном транспортными потерями, потерями на перевозку от склада до электролизеров и содержанием мелких фракций, значительная часть которых теряется в виде пыли.

Расход фторидов (криолит и трифторид алюминия) зависит от многих факторов: типа электролизера; состояния технологии; состава и температуры перегрева электролита; наличия, вида, КПД и КПИ газосборного и газоочистного оборудования; состояния технологической дисциплины; содержания оксида натрия в глиноземе; количества снимаемой угольной пены и эффективности ее флотации и др.

Расход анодов зависит от типа электролизеров. Фактически в электролизере на производство 1 т алюминия расходуется 420–460 кг обожженных анодов. При этом остается огарок, следовательно, полная потребность в обожженных анодах зависит от качества анода и величины огарка. Расход анодной массы также зависит от многих факторов: потерь при транспортировке, потерь летучих компонентов при коксовании пека и с поверхности жидкой анодной массы, осыпания и окисления боковых поверхностей анода, выхода по току и плотности тока.

Расход электроэнергии зависит главным образом от типа электролизера и выхода по току. При прочих равных условиях наибольший расход электроэнергии — у электролизеров ВТ, а наименьший — у ванн с ОА.

Источником выделения вредных веществ при производстве алюминия является используемое сырье и материалы. При этом зачастую очень важную роль играет не столько химический состав применяемых сырья и материалов, сколько их физические характеристики, такие, например, как гранулометрический состав.

Образование и выделение из электролизеров фтористых соединений, основным из которых является фторид водорода, происходят непрерывно, хотя они и не связаны непосредственно с электрохимическим процессом, а обусловлены процессами испарения и разложения расплава электролита и загружаемых фтористых солей. Летучестью электролита и загружаемых фтористых солей обусловлено выделение из электролизеров лишь некоторой части твердых фторидов, обнаруживаемых в пыли. Вторым источником пылевидных фторидов служит механический унос загружаемых солей восходящими потоками анодных газов либо отсасываемой от электролизера газовой смеси.

Источником выделения и выбросов в атмосферу смолистых веществ при производстве алюминия в электролизерах с самообжигающимися анодами (БТ и ВТ) является каменноугольный пек, используемый в качестве связующего при получении анодной массы. Смолистые вещества выделяются из электролизеров в результате термохимических процессов, происходящих при коксовании анодной массы. Вторым источником выделения смолистых веществ связан с операцией перестановки токоподводящих штырей в аноде на электролизерах ВТ. При использовании рядовой анодной массы после раскручивания и извлечения штыря в образовавшееся отверстие в спеченной части анода затекает жидкая анодная масса из верхних зон. При попадании жидкой анодной массы в зону высоких температур происходит бурное коксование пека с образованием большого количества возгонов смолы, которое выбрасывается в атмосферу корпуса. Кроме того, сырая угольная масса налипает на горячий штырь в момент извлечения его из анода, когда раскаленная его часть касается слоя жидкой анодной массы, при этом в атмосферу корпуса также выделяются смолистые погоны.

Смолистые вещества, образующиеся при коксовании анодной массы на электролизерах ВТ и поступающие в газосборник, дожигаются в горелках. Полнота сгорания зависит от конструкции горелок, регулировки процесса горения и контроля за процессом. Часть несгоревшей смолы, особенно ее тяжелые фракции, конденсируется и вместе с пылью оседает в каналах газоходов, остальная поступает на газоочистку. В зависимости от типа электролизера, условий и уровня его эксплуатации объем и состав пылегазовоздушной смеси может изменяться.

Таблица 9.12. Выбросы пыли в атмосферу и образование отходов при производстве первичного алюминия

Наименование	Единица измерения	Технология электролиза ОА	Технология электролиза самообжигающимися анодами	Технология электролиза ВТ
Пыль общая	кг/т Al	3,4–4,9	3,20–5,50	3,2–16,9
Угольная пена	кг/т Al	до 0,8	до 13	15–43

На рис. 9.10 представлен график показателей ресурсо- и энергоэффективности при производстве первичного алюминия.

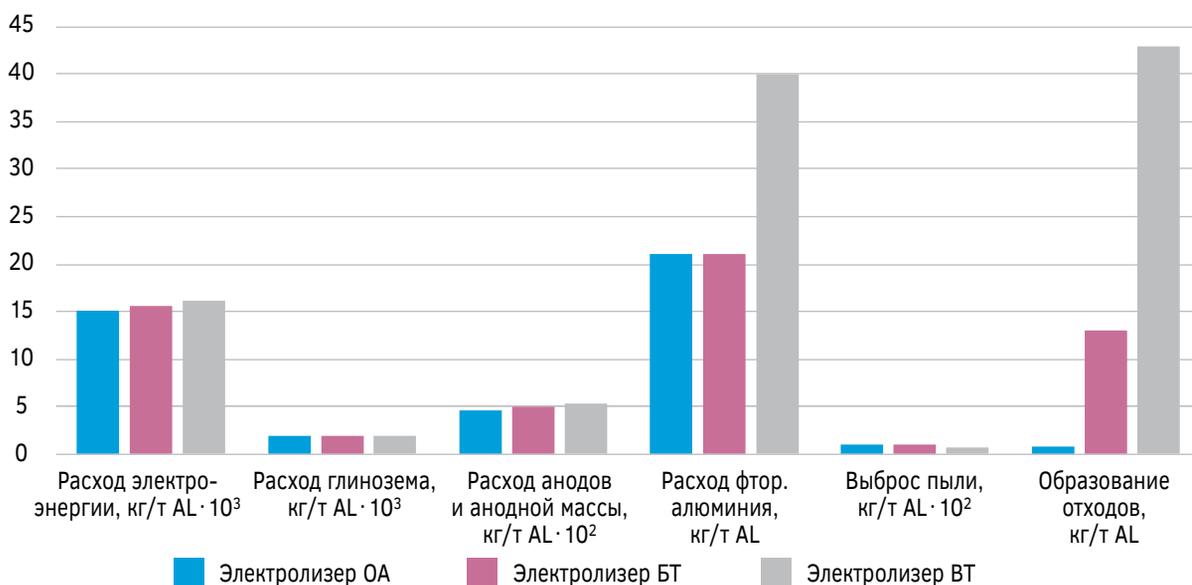


Рис. 9.10. График показателей ресурсо- и энергоэффективности при производстве первичного алюминия

РОЛЬ АЛЮМИНИЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В ГЛОБАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКЕ

Стремительный рост производства крылатого металла был обусловлен, с одной стороны, развитием технологий его производства, а с другой — расширением сфер применения алюминия. Индустриализация, урбанизация, технический прогресс — алюминий стал неотъемлемой составляющей этих процессов. Сегодня высокое потребление алюминия в оценке «килограмм на душу населения» признается экономистами одним из наглядных показателей сильной и развитой экономики. Неудивительно, что в лидерах по этому показателю находятся государства с высоким ВВП, являющиеся флагманами технического развития, такие как США, Япония, страны Европы.

Предложение

Алюминиевый рынок делится на производителей первичного алюминия и сплавов на его основе — сегмент upstream, производителей алюминиевой продукции — сегмент downstream и производителей алюминия из вторичного сырья (переработка алюминия).

Сегмент upstream — это не только производство первичного алюминия и сотен различных сплавов, но и вся сырьевая цепочка, которая предшествует этому процессу. Для производства алюминия требуется добыть боксит, переработать его в глинозем и доставить на алюминиевый завод. Крупнейшие мировые производители алюминия, как правило, представляют собой вертикально-интегрированные холдинги, включающие в себя бокситовые рудники и глиноземные заводы. Преимуществом вертикальной интеграции для крупных компаний является то, что они становятся независимыми от колебаний цен и многих других внешних факторов, обеспечивая себя сырьем в необходимом объеме для непрерывного процесса производства алюминия. Небольшие производители, как правило, закупают сырье у внешних поставщиков.

Наибольшие запасы бокситов в мире сосредоточены в тропическом и субтропическом поясах Земли, поэтому основные объемы добычи обеспечивают страны Юго-Восточной Азии, Латинской Америки и Африки, а также Австралия. Как правило, в этих регионах расположено и производство глинозема, что позволяет экспортировать более сложный продукт с добавленной стоимостью.

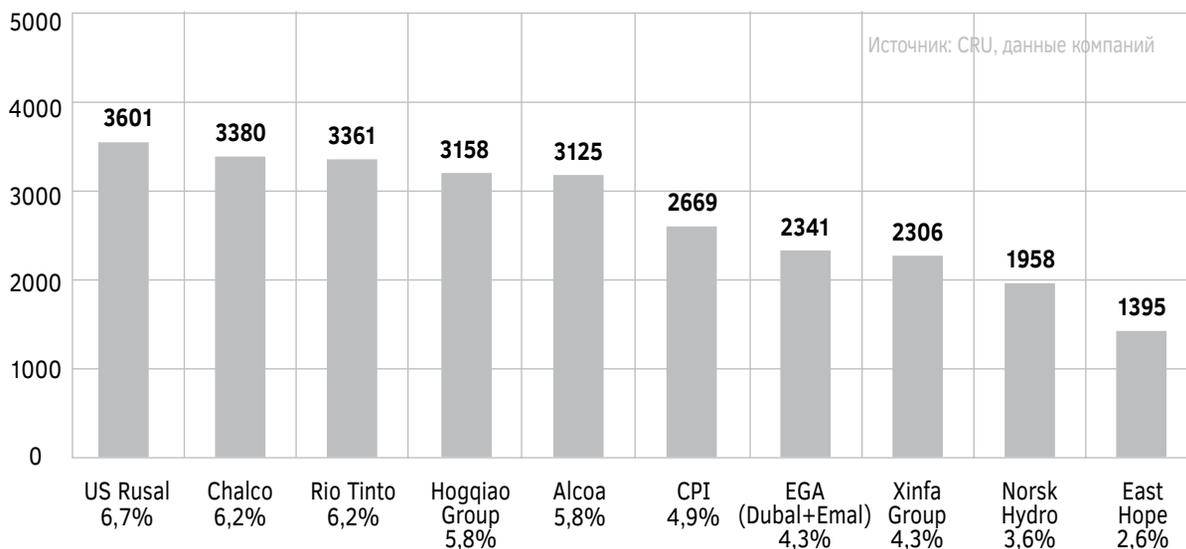


Рис. 9.11. Крупнейшие производители алюминия в мире

На сегодняшний день крупнейшим производителем первичного алюминия в мире является российская компания РУСАЛ, созданная в 2000 г. В ее состав входят предприятия по производству алюминия, глинозема и бокситов на территории России и Украины, а также иностранные активы, вошедшие в результате серии слияний и поглощений в 2000-х гг.

Старейшим производителем металла в мире, также входящим в ТОП-10, является американская Alcoa. Она была основана 1 октября 1888 г. одним из изобретателей применяемой сегодня во всем мире технологии электролиза алюминия Чарльзом Мартином Холлом и называлась тогда Pittsburgh Reduction Company. В 1907 г. название изменили на «Алюминиевая компания Америки» (Aluminum Company of America), оно сохранялось до 1999 г., когда его официально сократили до Alcoa.

Еще один участник рейтинга — австралийско-британский концерн Rio Tinto, одна из крупнейших в мире диверсифицированных горнометаллургических компаний. В 2007 г. она приобрела за рекордные 38 млрд долларов канадскую алюминиевую компанию Alcan (Aluminum Company of Canada Limited), что позволило ей стать одним из глобальных лидеров по производству алюминия. Кстати, Rio Tinto обошла Alcoa, которая также участвовала в борьбе за Alcan.

Западную Европу в топ-листе производителей представляет норвежская Hydro. Компания тоже имеет более чем столетнюю историю: она была основана в 1905 г. изначально для реализации проектов в гидроэнергетике и с тех пор выросла в крупный международный энергометаллургический холдинг.

За последние несколько лет в список крупнейших upstream-производителей вошло большое количество китайских компаний — Chalco, Hoggqiao, Xinfra, East Hope, и их доля постоянно растет. Сегодня китайский алюминиевый рынок является крупнейшим в мире по объемам производства, на него приходится около половины мирового объема. При этом свыше 90% алюминиевого производства в Китае обеспечивается энергией работающих на угле электростанций, создавая серьезную нагрузку на окружающую среду.

Еще одним крупным игроком рынка становятся компании из Ближнего Востока, такие как EGA (объединенные Dubal и Emal), Alba, Qatar Aluminium, Sohar Aluminium и другие. Все они

обладают важным преимуществом: возможностью использовать для производства дешевую электроэнергию, получаемую при сжигании попутного газа нефтяных месторождений.

Быстро наращивают объемы производства компании из Индии — Hindalco, Vedanta и другие. По прогнозам, Индия может стать крупным экспортером алюминия на международный рынок, поскольку рост мощностей уже сегодня превышает объем внутреннего потребления.

Количество downstream-производителей в мире исчисляется тысячами. Их продукция — это огромный спектр товаров, начиная от алюминиевых полуфабрикатов и заканчивая готовыми алюминиевыми изделиями.

Среди крупнейших downstream-производителей — американские Novelis и Aleris, британская Rexam, европейские Constellium и SAPA и многие другие компании, производящие алюминиевые банки, фасадные материалы, части фюзеляжа и корпусов автомобилей, материалы упаковки, трубы, панели, профили и прочие виды огромного списка алюминиевой продукции.

В последнее время среди upstream-компаний наметилась тенденция к развитию собственных downstream-направлений, что позволяет им получать дополнительную прибыль. Например, Alcoa заявила, что взяла курс на трансформацию бизнес-модели и больше не будет являться чисто сырьевой компанией. Норвежская Hydro, оставаясь одним из лидеров по производству первичного металла, также является одним из ведущих европейских производителей downstream-продукции. Крупнейший производитель алюминия в мире РУСАЛ тоже имеет downstream-сегмент — производство всех видов алюминиевой фольги для нужд пищевой, строительной и электротехнической отраслей промышленности.

Спрос

Производство алюминия в мире из года в год увеличивается вслед за непрерывно растущим спросом на этот металл.

В среднем мировая потребность в алюминии увеличивается на 5–7% ежегодно. Так, мировое потребление первичного алюминия в 2014 г. по сравнению с 2013 г. увеличилось на 7% — до 54,8 млн т. А по итогам 2015 г. мировой спрос должен вырасти еще на 6% — до 58 млн т.

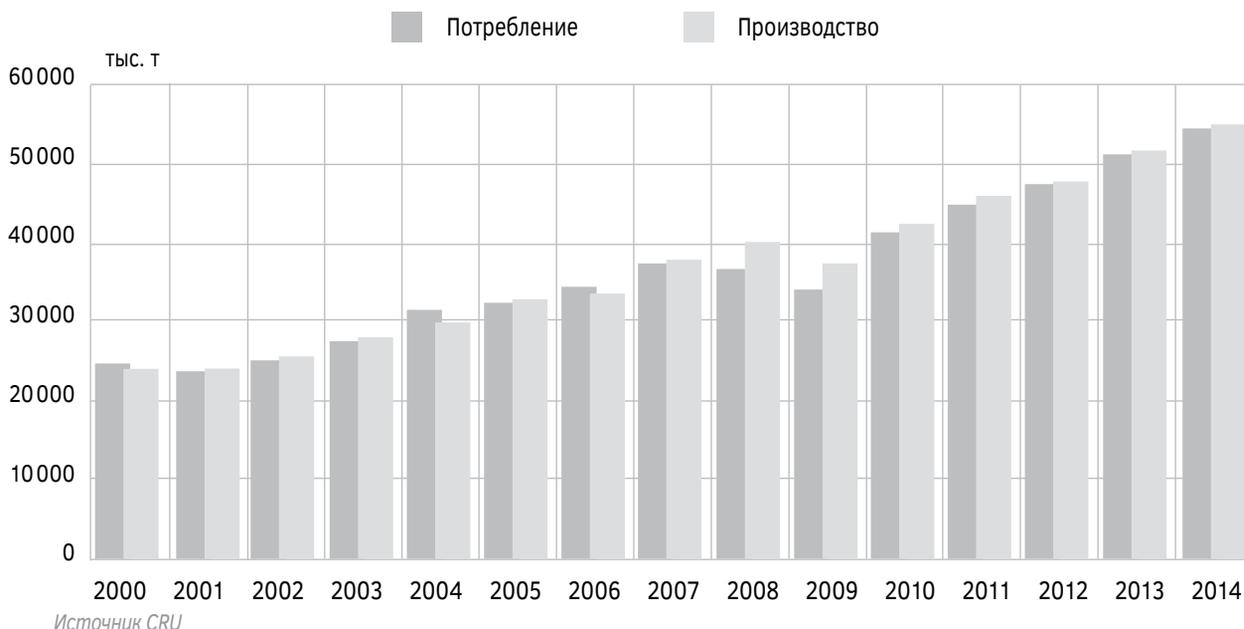


Рис. 9.12. Производство и потребление алюминия в мире

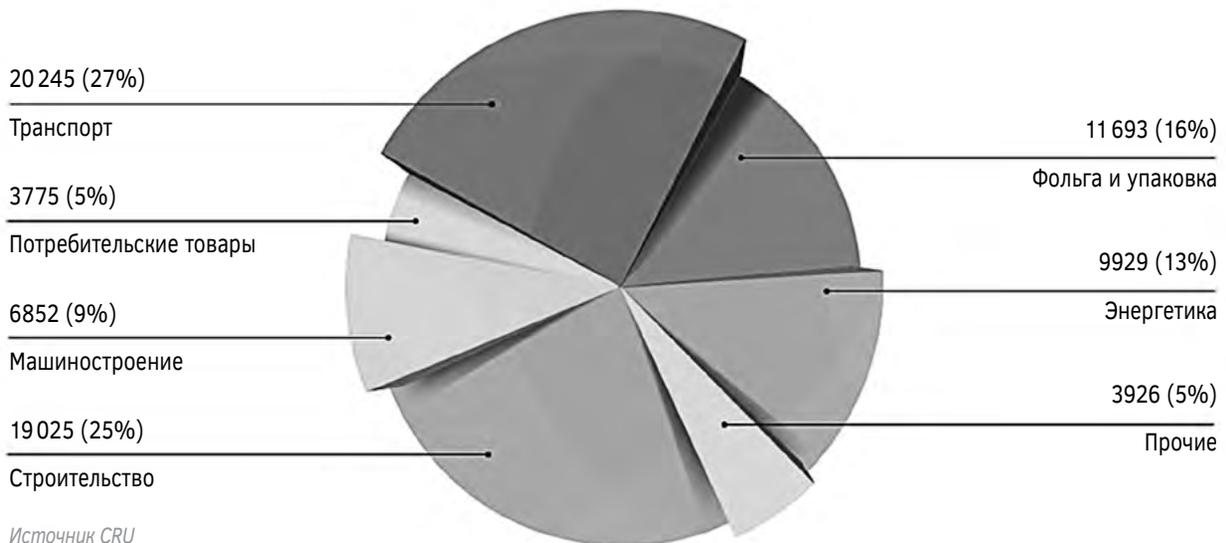


Рис. 9.13. Потребление по отраслям (тыс. т)

Вместе с тем рост потребления алюминия происходит на фоне глобальной урбанизации и индустриализации. И если в странах с развитой экономикой уже достигнут высокий уровень экономического развития, то развивающиеся страны как раз весьма активно наверстывают упущенное.

Глобальный алюминиевый рынок сегодня можно условно разделить на две части: Китай и все остальные страны. За последнее десятилетие Китай продемонстрировал феноменальные темпы экономического роста, и в том числе стал крупнейшим в мире производителем и потребителем алюминия.

На КНР сегодня приходится половина всего мирового объема производства и потребления алюминия, ни одна другая страна не может приблизиться к Китаю по этому показателю. При этом все свои потребности в первичном металле Китай закрывает исключительно собственным же производством, поэтому чаще всего он рассматривается отдельно от мирового. В то же время Китай активно наращивает экспорт алюминиевых полуфабрикатов, конкурируя на глобальном рынке с западными компаниями.

На втором и третьем местах по объемам потребления алюминия — рынки Европы и США, где спрос исторически очень велик по причине высокого уровня промышленного развития экономик этих стран. Еще один крупный рынок — Япония, не только страна с развитой экономикой, но и родина огромного количества технических новинок в сфере электроники и приборостроения. При этом Страна восходящего солнца импортирует весь необходимый ей первичный металл, совершенно не имея собственного алюминиевого производства. Причина в отсутствии на ее территории мощных и дешевых источников электроэнергии.

Также постоянный хороший прирост потребления показывают активно развивающиеся страны Юго-Восточной Азии.

Наибольшее количество алюминия идет на нужды транспортной и строительной отраслей экономики — в 2014 г. на них пришлось 27 и 25% соответственно. Из алюминиевых сплавов делают детали фюзеляжа самолетов, части корпусов автомобилей и поездов, детали топливных систем, систем кондиционирования, части моторов, детали кресел и внутренней отделки, яхты и морские суда, космические шаттлы и твердое ракетное топливо. В наш век в моде легкость, скорость и надежность, а гарантировать все это может только алюминий.

В строительстве этот металл также завоевал весьма прочные позиции: без него не обходится ни один небоскреб, ни одно металлокаркасное здание, да и обычный жилой дом. Оконные и дверные панели, кровля, строительные каркасы, фасадные и несущие конструкции,

элементы внешнего декора, сайдинги, лестницы, системы кондиционирования и отопления — все это сегодня производится с использованием алюминия и сплавов на его основе.

Следующими по объему отраслями использования являются упаковка и энергетика — 16 и 13%. Алюминий незаменим при производстве линий электропередач и телефонных проводов, радиолокаторов, конденсаторов и так далее. В сфере упаковки главные позиции занимают пищевая фольга и алюминиевая банка для напитков. В мире ежегодно производится более 200 млрд банок для напитков, ну и ничего более удобного и качественного, чем упаковка из алюминиевой фольги, человечество пока еще не придумало.

Торговля

Алюминий является биржевым товаром. Такие товары имеют стандартизированные потребительские свойства — потребителю не важно, какая именно компания произвела их. Они взаимозаменяемы, легко транспортируются и хранятся, могут дробиться на партии. Именно поэтому на сырьевых биржах торгуется *upstream*-продукция, а не полуфабрикаты или готовые изделия. Когда товарно-сырьевые биржи только создавались, они служили местом для заключения физических контрактов на поставку таких биржевых товаров, однако с увеличением объемов торгов и развитием финансовых инструментов роль бирж изменилась.

Сегодня на них торгуются фьючерсные контракты на сырье — финансовые инструменты, которые практически никогда не влекут за собой реальную физическую поставку (вместе с тем такая возможность не исключается). В результате торгов устанавливается цена, служащая ориентиром для производителей и потребителей по всему миру. Сама биржа при этом ничего не покупает и не продает, она лишь предоставляет площадку для проведения торгов профессиональным игрокам рынка — брокерам.

В мире существует несколько товарно-сырьевых бирж, торгующих металлами, которые расположены в регионах с крупнейшим спросом на них. В Китае — это Шанхайская фьючерсная биржа (SHFE), в Северной Америке — Чикагская товарная биржа (CME). Однако крупнейшей в мире биржей по торговле металлами в целом и алюминием в частности является Лондонская биржа металлов (LME), образованная еще в 1877 г.

LME начала продавать алюминий в 1978 г. Более века назад, когда биржа только создавалась, торговцы встречались в небольшой кофейне недалеко от Королевской биржи и заключали сделки с голоса, собираясь в круг. Сегодня на LME ежегодно торгуются около 3,7 млрд т различных металлов на сумму примерно 14,5 трлн долларов. Это в три раза больше, чем ВВП Японии.

В июне 2012 г. новым владельцем LME стала Гонконгская фондовая биржа (HKEX), которая приобрела ее за 1,4 млрд фунтов стерлингов.

Алюминий является крупнейшим по объему торгов биржевым товаром среди всех металлов в мире. На него приходится почти треть заключаемых на LME контрактов. На бирже торгуются свыше 100 марок алюминия от ведущих производителей, она работает более чем с 700 различными специализированными складами для металлов в 14 странах мира. Это необходимо, чтобы покупатель всегда мог физически приобрести купленный металл, так как, несмотря на то что львиная доля контрактов — фьючерсные сделки, никто не запрещает покупать алюминий на бирже реальному промышленному покупателю для производственных нужд. Такая функция биржи получила название «рынок последней надежды». На практике это означает, что покупатель всегда может купить, а продавец всегда может продать металл по биржевому контракту по установленной биржевой цене и получить или поставить товар на один из биржевых складов.

Главным органом управления торгами является биржевой комитет, он ежедневно объявляет официальную цену дня на алюминий, устанавливая ее по совокупному результату прошедших торгов. Торговля проходит в соответствии со стандартными биржевыми

контрактами. В каждом таком контракте определяется объем товара (для алюминия это минимум 25 т), условия поставки (это может быть любой склад Лондонской биржи), срок исполнения (немедленная поставка, трехмесячный, шестимесячный срок и т. д.) и требования к качеству (металл должен быть сертифицирован на бирже).

Биржевая цена, устанавливаемая в ходе торгов, — ключевой ценовой ориентир (price benchmark) для продавцов и покупателей алюминия по всему миру, но это не конечная стоимость металла.

Сегодня итоговая цена на алюминий для потребителя складывается, как правило, из трех составляющих: биржевой цены, региональной премии, которая зависит от доступности металла на конкретном рынке, а также продуктовой наценки в зависимости от типа продукции. Если ценовым ориентиром в мировой торговле служат котировки алюминия на LME, то в переговорах о размере премии за физическую поставку производители и потребители ориентируются на данные о премиях, публикуемых в авторитетных специализированных журналах, таких как Platts, Metal Bulletin, Nikkei.

Связующим звеном между производителями и потребителями металла зачастую выступают трейдеры. Они обеспечивают обработку средних и небольших заказов, берут на себя часть финансовых рисков сделки, располагают собственными сетями складов, удобно расположенных для потребителей, а также оказывают прочие сопутствующие услуги.

Кризис 2008 года

Когда биржи только появлялись, считалось, что формируемая на них цена наиболее справедлива, так как отражает реальный баланс спроса и предложения. Однако мировой финансовый кризис 2008 г. выявил существенные недостатки биржевого ценообразования.

Последовавший за ним спад потребительской активности и промышленного производства стал серьезным испытанием для алюминиевой отрасли. Спрос на алюминий резко сократился, а цена за тонну алюминия упала с 3200 до 1200 долларов. Производители были вынуждены поставлять алюминий по контрактам LME, поскольку не могли так же быстро сократить объемы выплавляемого металла вслед за падением спроса. В результате за несколько лет объем хранящегося на складах LME металла вырос с 1 до 5 млн т.

Ситуацией воспользовались финансовые игроки: алюминий стал для них финансовым инструментом с гарантированной доходностью за счет доступного дешевого финансирования и ценового контанго — ситуации, при которой будущая цена на металл выше текущей. В итоге объем биржевой торговли алюминием на LME с 2007 по 2014 г. вырос в 34 раза (+3300%), тогда как в действительности реальный физический спрос за этот же период увеличился не более чем на 40%.

Финансовые сделки «заморозили» весь скопившийся на складах объем алюминия, поскольку каждая такая сделка должна быть обеспечена реальным металлом. Покупатели, желающие приобрести алюминий по биржевому контракту, были вынуждены ожидать поставки со склада в течение полутора лет и больше. Сформировались очереди на отгрузку алюминия со складов LME. В свою очередь это привело к росту премий за немедленную поставку металла — их размер в середине 2014 г. превышал 20% биржевой цены алюминия. Тогда как средний уровень премии за последние 25 лет колебался в размере 60–80 долл./т, то есть в пределах 5%.

Лондонская биржа попыталась вернуть рынок в сбалансированное состояние, проведя внутреннюю реформу, в ходе которой были установлены новые правила загрузки и отгрузки металла со складов, что существенно ограничило возможности финансовых игроков.

В то же время с учетом высоких объемов алюминия, хранящегося на складах, крупнейшие производители алюминия сократили часть своего производства за счет устаревших

и нерентабельных мощностей. В частности, были остановлены предприятия, работавшие с использованием угольной генерации и не отвечающие современному взгляду на нормативы выбросов углекислого газа, что сделало отрасль в целом более эффективной и экологичной.

Наиболее активными в этом процессе были западные компании, такие как РУСАЛ и Alcoa, тогда как производители Китая и Ближнего Востока, напротив, продолжили наращивание объемов выпуска. Ближневосточные компании исходят из того, что наличие дешевой электроэнергии за счет использования попутного газа позволяет им иметь крайне низкую себестоимость алюминия и выгодно продавать металл даже при низких ценах. Что же касается Китая, то на первый план здесь выходят вопросы обеспечения рабочих мест и поддержания высоких темпов экономического роста.

Несмотря на все сложности, прогнозируется, что потребление алюминия продолжит динамично расти. К 2030 г. объем потребления крылатого металла может перевалить за 80 млн т, таким образом позволяя алюминию не только отстоять, но и укрепить свои лидерские позиции как ключевого конструктивного материала нашего времени.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОТРАСЛИ

Алюминиевая промышленность по масштабам производства и потребления занимает первое место среди подотраслей цветной металлургии. По этим же показателям она второй по важности металлургический сегмент и уступает лишь стали. Меняется уклад экономики, образ жизни, социализируется общество — алюминий соответствует данным тенденциям развития.

Баланс спроса и предложения

Производство алюминия в мире из года в год увеличивается вслед за непрерывно растущим спросом. Так в период с 2009 по 2016 г. мировой рынок алюминия вырос на 30%.

Несмотря на колебания мировой экономики 2017 г. оказал положительное влияние на алюминиевую отрасль. Мировой спрос на алюминий по итогам 2017 г. вырос на 6% по сравнению с предыдущим годом благодаря экономическому росту в крупнейших регионах мира, включая Китай, Европу и Северную Америку. В результате уверенного роста спроса дефицит на мировом рынке алюминия составил 0,6 млн т в 2017 г. и, по оценкам, увеличится до 1,7 млн т в 2018 г. Мировой рост потребления на алюминий поддержан, прежде всего, быстрым экономическим развитием и урбанизацией Китая, доля которого в общем объеме мирового потребления составляет более 50%.

Ожидается, что производство первичного алюминия в мире в 2018 г. вырастет на 1% по сравнению с ростом 5,7% в 2017 г.

Основной причиной изменения баланса между спросом и предложением специалисты называют сокращение производства алюминия в Китае, где правительство требует закрытия предприятий, выпускающих металл без лицензии и с избыточным воздействием на окружающую среду. Данная реформа оптимизации привела к сокращению на 10 млн т в 2017 г. нелегальных мощностей, как построенных, так и ранее проектируемых.

Мировой рынок алюминия с 2017 г. вступил в период дефицита, который продлится, по меньшей мере, до 2020 г. Этим обусловлено сокращение складских запасов на Лондонской бирже металлов с 2,2 млн т на конец 2016 г. до 1,3 млн т на октябрь 2017 г.

В ближайшие 5 лет в среднем прогнозируется увеличение мирового потребления на 4–5% ежегодно, что влечет за собой сохранение дефицита первичного алюминия.

Уровень цены на алюминий

В 2017 г. цена алюминия на LME выросла на 22,7% по сравнению с прошлым годом. Данный рост произошел на фоне масштабного сокращения мощностей в Китае и постоянного сокращения запасов на LME. В Китае рост себестоимости привел к тому, что существенная часть китайского алюминиевого производства находилась в конце 2017 г. на грани рентабельности.

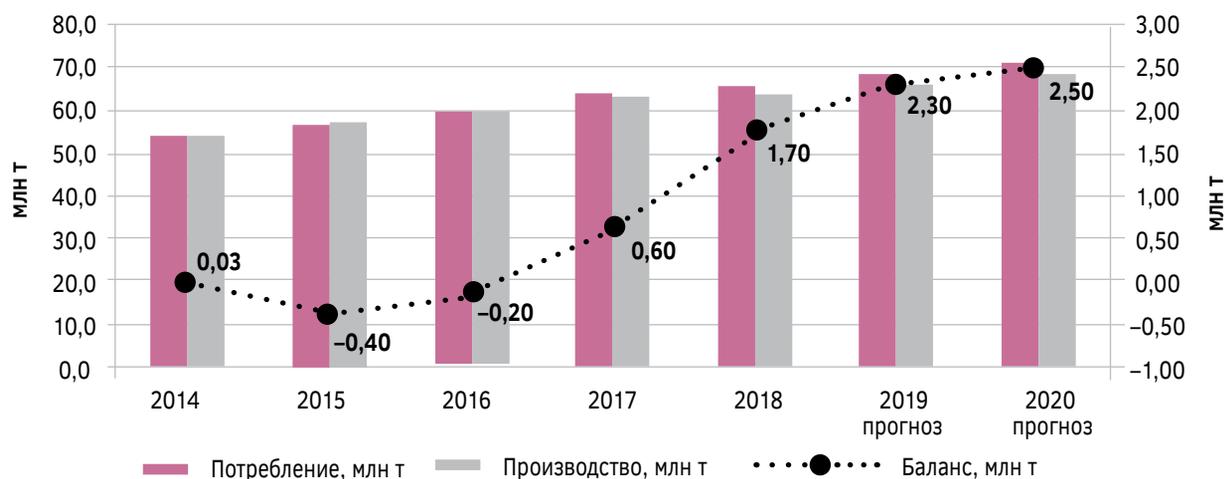


Рис. 9.14. Мировой баланс производства и потребления алюминия, 2014–2020 гг.

Начало 2018 г. оказалось богатым на события. В результате объявления США о введении пошлин на импорт алюминия и введении санкций против Российского производителя первичного алюминия АО «Русал» в апреле 2018 г. цена алюминия на LME достигла 2550 долларов США за тонну — почти своего шестилетнего максимума, закрепившись впоследствии на уровне 2211 долларов США за тонну.

По оценкам АКРА, в 2018–2019 гг. средние цены на алюминий составят 2050–2150 долл./т. Дополнительную поддержку ценам на металлы оказывает снижение широкого индекса доллара за восемь месяцев 2017 г.

Производство алюминия в мире

Производство первичного алюминия в мире в 2017 г. увеличилось на 5,7% — до 63,5 млн т. Лидером по-прежнему остается Китай, где прирост составил 9,5% (до 36,4 млн т). Производство первичного алюминия на рынках вне Китая увеличилось на 1% — до 27,2 млн т. Распределение производства алюминия по регионам, по данным Международного института алюминия, отражено в табл. 9.13.

Китай остается главным и практически единственным драйвером мирового производства — 57% и потребления — 54,4% металла. По данным руководства страны, алюминиевый комплекс нуждается в серьезной реструктуризации. Установленные мощности по выпуску первичного металла достигли 40 млн т при потреблении около 33 млн т. Избыток мощностей в основном относится к экологически сложному электролизному переделу в составе неэффективных устаревших заводов.

Однако в связи с ужесточением экологических норм в регионе, высоких издержек на перезапуск и низкой рентабельности существенная часть алюминиевых производств, закрытых в течение зимнего периода, не будут перезапущены после его окончания. Кроме того, реализуемые мероприятия могут привести к сокращению производства алюминия в годовом выражении на 1 млн т.

Таблица 9.13. Структура производителей алюминия по регионам

Регион	2016 г.		2017 г.		Прирост, %
	млн т	%	млн т	%	
Северная Америка	4,0	7	4,0	6	-1,9
Южная Америка	1,4	2	1,4	2	1,2
Западная Европа	3,8	6	3,8	6	-0,1
Восточная и Центральная Европа	4,0	7	4,0	6	0,5
Африка	1,7	3	1,7	3	-0,8
Азия (без Китая)	8,6	14	9,1	14	5,3
Китай	32,6	55	35,9	57	10,0
Австралия и Океания	2,0	3	1,8	3	-7,8
Оценочный незарегистрированный	1,8	3	1,8	3	0,0
МИР В ЦЕЛОМ	59,9	100	63,5	100	6,4

Дополнительным фактором сокращения мощностей в Китае являются претензии США по поводу чрезмерного роста поставок алюминиевых полуфабрикатов из Китая.

Экспорт алюминиевых полуфабрикатов из Китая находится под существенным давлением в связи с международными антидемпинговыми расследованиями. В результате чего США объявил введение пошлин на импорт алюминиевой продукции.

Потребление алюминия в мире

Рост потребления алюминия происходит на фоне глобальной урбанизации и индустриализации. И если в странах с развитой экономикой уже достигнут высокий уровень экономического развития, то развивающиеся страны как раз весьма активно наверстывают упущенное.

Наибольшее количество алюминия идет на нужды транспортной и строительной отраслей экономики — в 2017 г. на них пришлось 27 и 26%, соответственно. В наш век в моде легкость, скорость и надежность, а гарантировать все это может только алюминий.

В строительстве этот металл завоевал весьма прочные позиции: без него не обходится ни один небоскреб, ни одно металлокаркасное здание, да и обычный жилой дом уже трудно представить без алюминиевых элементов.

Следующими по объему отраслями использования являются энергетика и машиностроение — 14 и 9%. Алюминий незаменим при производстве линий электропередач и телефонных проводов, радиолокаторов, конденсаторов и так далее. Из алюминиевых сплавов делают детали фюзеляжа самолета, части корпусов автомобилей и поездов, детали топливных систем, систем кондиционирования, части моторов, детали кресел и внутренней отделки, яхты и морские суда, космические шаттлы и твердое ракетное топливо.

В общей структуре потребления упаковка занимает 9%. Главные позиции занимают пищевая фольга и алюминиевая банка для напитков. В мире ежегодно производится более 200 млрд банок для напитков. Мировой спрос на алюминий по итогам 2017 г. вырос на 6%, по сравнению с предыдущим годом достиг 64,2 млн т благодаря экономическому росту в крупнейших регионах мира, включая Китай, Европу и Северную Америку.

Спрос на алюминий вне Китая составил 3,7%, увеличившись до 29,2 млн т. Спрос на алюминий в Китае увеличился на 7,8%, увеличившись до 34,9 млн т. Несмотря на высокие цены на алюминий, процесс перезапуска мощностей вне Китая идет медленно в связи с высокими издержками и отсутствием конкурентного энерготарифа.

Таблица 9.14. Структура потребления алюминия по отраслям

Отрасль потребления	2016 г.		2017 г.		Прирост, %
	млн т	%	млн т	%	
Транспорт	15,3	25,7	17,1	27	11,3
Строительство	15,5	26	16,7	26	7,7
Энергетика	8,4	14	9,0	14	7,5
Машиностроение	5,7	9,5	6,0	9	5,8
Фольга	4,8	8	5,0	8	4,8
Упаковка	4,3	7,2	4,5	7	4,6
ТНП	3,0	5	3,1	5	3,2
Другие	2,7	4,6	2,8	4	2,9
ИТОГО	59,7	100	64,2	100	7,54

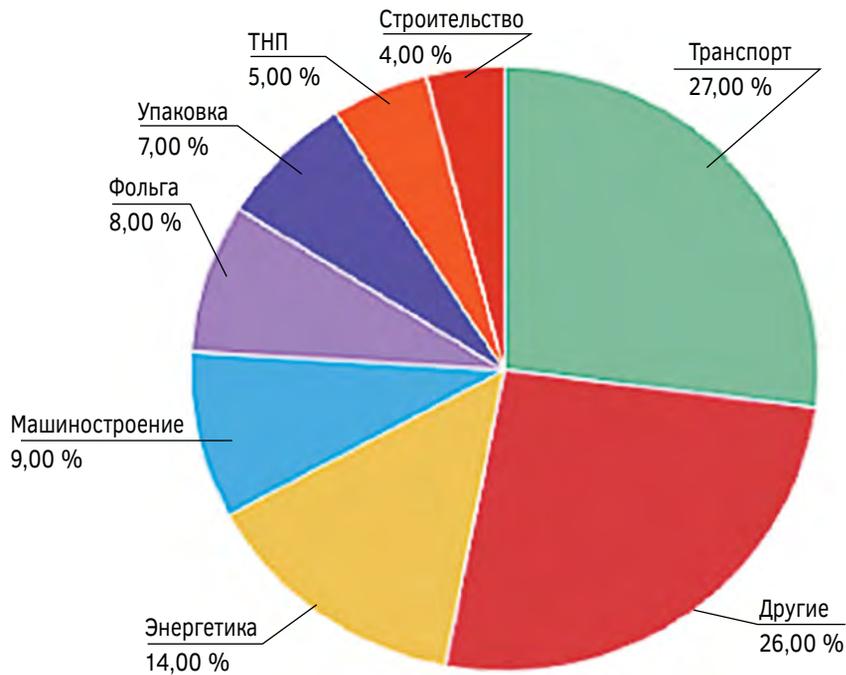


Рис. 9.15. Структура потребления алюминия по отраслям за 2017 г.

Таблица 9.15. Структура потребления алюминия по регионам

Регион	2016 г.		2017 г.		Прирост, %
	млн т	%	млн т	%	
Северная Америка	4,7	8	5,0	7,8	6,8
Южная Америка	1,4	2	1,5	2,3	6,6
Западная Европа	4,8	8	5,1	7,9	7,0
Восточная и Центральная Европа	3,6	6	3,8	5,9	6,6
Африка	1,6	3	1,6	2,5	4,5
Азия (без Китая)	8,2	14	8,7	13,5	6,5
Китай	32,1	54	34,9	54,4	8,7
Австралия и Океания	1,8	3	1,9	2,9	5,7
Оценочный незарегистрированный	1,8	3	1,8	2,8	0,0
МИР В ЦЕЛОМ	60,0	101,0	59,7	100	7,5

В обозримой перспективе основным фактором, определяющим рыночную ситуацию, останется соотношение спроса и предложения алюминия в Китае, а также состояние запасов на бирже LME.

Состояние мирового рынка алюминия характеризуется как умеренно-дефицитное.

Как повлияют события, связанные с введенными антиросийскими санкциями против компании АО «Русал», на мировой рынок, пока говорить рано, но аналитики не исключают, что мировой рынок алюминия ждет реконфигурация.

Перспективные направления в производстве алюминия

Инертные аноды всегда были целью производителей алюминия. Для инертного анода пытались использовать многие материалы. На самом деле полностью инертных материалов не существует, но некоторые материалы могут расходоваться с замедленной скоростью, и количество примесей, получаемых за счет растворения инертных анодов, может быть приемлемо для промышленного производства.

На сегодняшний день у «РУСАЛА» уже есть материал для инертного анода, который позволяет производить алюминий с более низкой себестоимостью по сравнению с технологией угольных анодов. На Красноярском алюминиевом заводе технология электролиза с инертными анодами на силу тока > 100 кА проходит опытно-промышленные испытания в опытном корпусе электролиза.

Химическая реакция производства алюминия в электролизерах с инертными анодами может быть представлена в следующем виде:



Таким образом, если при использовании обожженных анодов в электролизе при получении 1 т алюминия сгорает 0,5 т углерода с образованием 1,4 т оксида и диоксида углерода, то при использовании нерасходуемых инертных анодов в атмосферу будет выделяться 0,9 т кислорода. Кроме того, использование инертных анодов позволит исключить выбросы диоксида серы и смолистых веществ, значительно снизить выбросы пыли и фторидов за счет высокой герметизации электролизеров.

Для очистки от фтористых соединений и пыли при эксплуатации электролизеров с инертными анодами предусматривается установка сухой очистки газов (реактор + рукавный фильтр) с эффективностью по фтористым соединениям 98–99%.

Удельное количество ЗВ, поступающих в атмосферу при электролизе с инертными анодами, может составить:

- пыль — до 2 кг/т Al;
- фтористый водород — до 0,3 кг/т Al;
- твердые фториды — до 0,4 кг/т Al.

Перспективные направления в производстве глинозема

Последние годы большое внимание уделяется исследованиям по усовершенствованию технологии спекания нефелинов, а именно переводу печей спекания на сухой или полусухой способ термообработки шихты в коротких печах с теплообменниками.

Подобная технология внедрена в цементной промышленности для обжига клинкера и дала значительный экономический и экологический эффекты (экономия топлива — более 30%).

Реконструкция существующих печей спекания «мокрой» шихты или сооружение подобных установок при строительстве новых глиноземных заводов позволит достичь подобного эффекта. Однако валовые выбросы NO_x могут быть существенно снижены только за счет установки на печах горелок с низким выделением оксидов азота и внедрения специальных

перспективных технологий — технологии селективного некаталитического восстановления (SNCR) и технологии селективного каталитического восстановления (SCR), что позволит снизить выбросы NO_x от печей глиноземного производства в атмосферу до 70%.

SNCR заключается в инъекции водного раствора аммиака (до 25% NH_3), водных растворов соединений аммиака или мочевины в дымовые газы для восстановления NO до N_2 . В SCR NO и NO_2 восстанавливаются до N_2 с помощью NH_3 и катализатора.

Перспективными технологиями следует также считать применение современного газоочистного оборудования — электрофильтров и рукавных фильтров, обеспечивающих концентрацию пыли в выбросе менее 50 мг/м^3 , а также систем контроля, управления ремонтом, обслуживания при эксплуатации ГОУ.

Образование производственных отходов (шлама) неизбежно. Для его складирования постоянно требуются дополнительные площади. В настоящее время ведутся разработки, направленные на использование красного шлама в строительстве, извлечение из шлама ценных компонентов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алюминиевая промышленность мира // География. — 2001. — № 10. — С. 21.
2. Алюминиевые сплавы антифрикционного назначения / [Н. А. Белов и др.] ; под ред. А. Е. Миронова, Н. А. Белова, О. О. Столяровой. — М. : МИСиС, 2016. — 222 с.
3. Алюминий: Свойства и физическое металловедение : пер. с англ. / под ред. Дж. Е. Хэтча. — М. : Металлургия, 1981. — 423 с.
4. *Беляев, А. И.* Металловедение алюминия и его сплавов / А. И. Беляев, О. С. Бочвар, Н. Н. Буйнов [и др.]. — М. : Металлургия, 1983. — 280 с.
5. *Борисоглебский, Ю. В.* Металлургия алюминия / Ю. В. Борисоглебский, Г. В. Галевский, Н. М. Кулагин, М. Я. Минцис, Г. А. Сиразутдинов. — Новосибирск : Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1999. — 438 с.
6. ИТС НДТ 11–2016. Производство алюминия / Росстандарт. — М. : Бюро НДТ, 2016. — 156 с.
7. Отчет ФГУП «НИИ Атмосфера» «Анализ систем нормирования выбросов ЗВ и гигиенических нормативов, установленных к производству глинозема и алюминия в России и зарубежных странах (Европа и Северная Америка)», 2007–2009 гг.
8. Передовой опыт производства и переработки алюминия : информационный бюллетень. — СПб., 2000.
9. Перспективы развития технологических процессов глиноземного производства : сб. науч. тр. / АО «ВАМИ». — СПб., 1992. — 137 с.
10. Сайт об алюминии [электронный ресурс]. — URL: <https://aluminiumleader.ru> (дата обращения: 29.10.2019). — Загл. с экрана.
11. Современные технические решения электролитического получения алюминия и их реализация в промышленности : информационный бюллетень. — СПб., 1999.

ПРОИЗВОДСТВО КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Александр Иванович Захаров

РХТУ им. Д. И. Менделеева, доцент, зав. кафедрой,
доктор технических наук

Александр Юрьевич Санжаровский

Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики»,
научный сотрудник, кандидат технических наук

ВВЕДЕНИЕ

Керамика в истории человечества всегда играла важную роль, начиная с эпохи каменного века (неолита) керамические материалы широко использовались в качестве предметов ритуала, сосудов для приготовления и хранения пищи. Позднее керамика стала использоваться и при строительстве.

Керамические изделия составляют большую часть исторического наследия древних народов, дают наглядное представление о жизни цивилизаций. Их технологическое совершенство (форма, декор и сам материал) позволяет оценить степень развития общества. Активное применение керамики большинством из известных нам древних народов объясняется следующими основными причинами: распространенностью глин как сырья для производства большинства керамических изделий, относительной простотой их производства (достаточно обжига в костре или дровяной печи) и высокой стойкостью керамики к огню, агрессивным средам и биологическим субстанциям.

Технология керамики заключается в производстве изделий из порошков неметаллических и неорганических соединений путем закрепления формы, полученной различными способами формования, высокотемпературным обжигом. Для значительной части керамических изделий максимальная температура обжига составляет 900–1400°С. После обжига изделие отличается прочностью и твердостью.

Благодаря стойкости, соответственно, долговечности, а также прочности и твердости керамика использовалась как строительный материал в виде кирпичей и черепицы для возведения жилых зданий, защитных сооружений и храмов. Таким образом, наиболее древними областями применения керамики стали хозяйственно-бытовая и строительная.

Устойчивость значительной части керамических материалов к высоким температурам была востребована в таких древних технологиях, как выплавка металла и получение стекла. Производство самих керамических изделий также требовало высоких температур, поэтому стены, поды и своды печей выполняли из керамических кирпичей, произведенных из особых сортов глины. Так стало развиваться производство огнеупоров.

С развитием цивилизации относительно простые принципы технологии керамики позволили получать изделия разнообразной формы с уникальными свойствами, определявшимися химическим и фазовым составом материала. Помимо природного глинистого сырья использовали природные и специально синтезированные оксиды, силикаты, а начиная с XIX в. — бескислородные соединения: нитриды, карбиды, силициды и пр. Так керамика нашла применение в абразивной промышленности и машиностроении, электротехнике и электронике, авиации, космонавтике, медицине и других отраслях.

Из-за весьма широкой области применения невозможно охарактеризовать производство керамики в рамках одной отрасли. Наиболее широко керамика применяется в строительстве,

огнеупорной промышленности и для производства хозяйственно-бытовых изделий. Другие многочисленные производства керамических материалов можно отнести к производству технической керамики различного назначения.

Далее мы будем классифицировать виды и производства керамики по областям ее применения на (см. рис. 10.1):

- хозяйственно-бытовую;
- строительную;
- огнеупорную;
- техническую.

На рис. 10.1 представлена общая классификации керамических материалов по областям применения.

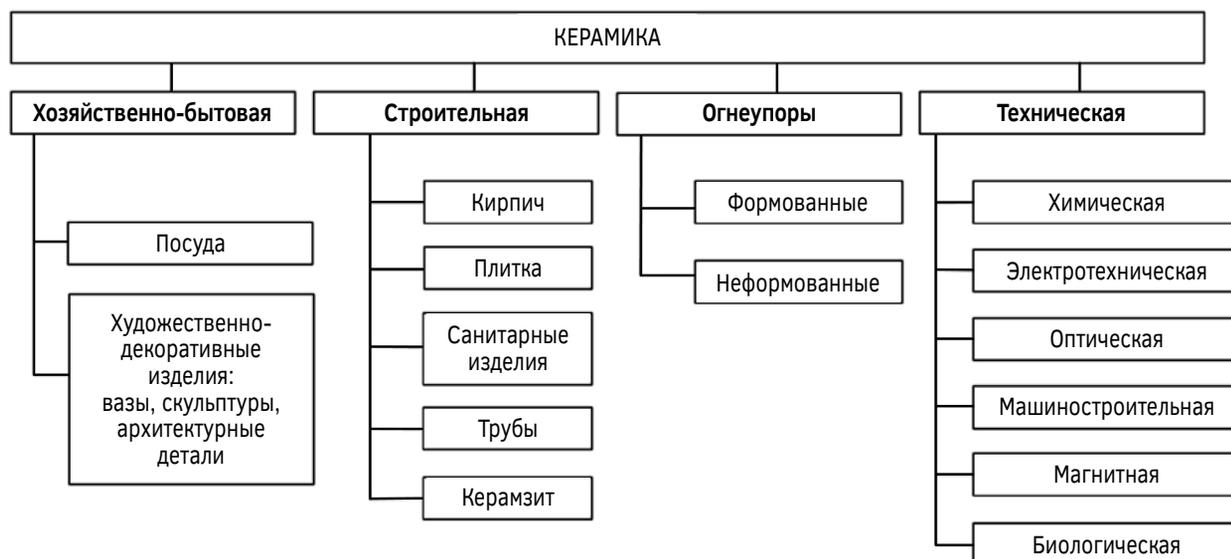


Рис. 10.1. Классификация керамических материалов по областям применения

Наиболее массовым является производство керамических строительных изделий, поэтому в настоящей статье отдельно рассматривается производство наиболее распространенных видов строительной керамики, таких как кирпич, керамическая плитка и санитарно-технические изделия. Эти изделия составляют значительную часть стройматериалов, используемых в жилищном и промышленном строительстве для несущих конструкций (кирпич и строительный камень), облицовки фасадов (лицевой кирпич, фасадная керамическая плитка) и оснащения интерьеров помещений (плитка для внутренней облицовки стен, плитка для пола, санитарно-технические керамические изделия).

Производство керамических изделий строительного назначения основано на использовании в основном местного сырья, прежде всего глин, и распространено повсеместно. Несмотря на спады производства, связанные с финансовыми кризисами, производства не только сохраняют свой потенциал, но и развиваются.

В статье описаны история, современное состояние и перспективы развития технологии керамической посуды, которая является товаром повседневного спроса. Технология хозяйственно-бытовых изделий имеет тысячелетнюю историю, но не потеряла своей актуальности по сей день. Отдельное внимание уделено огнеупорам, которые во многом определяют развитие черной и цветной металлургии, а также играют большую роль в печах для производства керамики, стекла, цемента, тепловых агрегатах химической промышленности и энергетики.

Технологию технической керамики из всех подотраслей производства керамики отличает наибольшая наукоемкость, использование дорогостоящего синтезированного сырья и специального оборудования.

В настоящей статье рассмотрены следующие основные подотрасли производства керамических изделий / материалов:

- керамический кирпич;
- керамическая плитка (напольная и стеновая);
- огнеупоры;
- санитарно-технические изделия;
- посуда и декоративные изделия (хозяйственно-бытовая керамика);
- техническая керамика.

ИСТОРИЯ ЗАРОЖДЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВА КЕРАМИКИ

Зарождение производства хозяйственно-бытовой керамики

Из первых керамических материалов, полученных обжигом глины, — терракоты и каменной керамики для хозяйственных и бытовых нужд изготавливали тотемные фигуры, сосуды для хранения и приготовления пищи, погребальную утварь. Возраст наиболее древних керамических изделий превышает 25 тыс. лет.

Появление гончарного станка в районе Междуречья, затем на Ближнем Востоке и Египте (IV–III тыс. до н. э.) определило существенный прогресс в производстве посуды, формы которой стали совершеннее, а количество изделий значительно возросло.

В эпоху расцвета древнегреческой и, затем, древнеримской цивилизаций производство керамических терракотовых сосудов, прежде всего амфор для перевозки и хранения масел, вин, воды, приобрело масштабы, сравнимые с современными фабриками. В те времена керамика для быта была основным материалом по сравнению с очень дорогим металлом, дефицитным и недостаточно стойким деревом. Помимо посуды в быту применяли керамические украшения и игрушки (рис. 10.2).



Рис. 10.2. Терракотовые игрушки. VII в. до н. э., Греция
(Национальный археологический музей, Афины)

Отдельно необходимо упомянуть производство керамических саркофагов, погребальных сосудов и другой утвари (рис. 10.3). Терракотовые сосуды (в виде амфор и саркофагов) и фигурки использовали в захоронениях как на территории стран Средиземноморья, так и в Древнем Китае и, позднее, в Древней Японии.

Яркой страницей в развитии хозяйственно-бытовой и художественной керамики было изготовление богато декорированных терракотовых сосудов, покрытых ангобами (вазопись — рис. 10.4).

Глазурованную керамику, древние виды майолики широко применяли в строительстве храмов мастера Междуречья, однако рассвет майолики пришелся на Средние века, когда в странах Арабского халифата появилась роспись по сырой глухой глазури. Европейская майолика получила распространение в украшении фасадов, интерьеров и в качестве посуды

в государствах Апеннинского полуострова в XIV–XVI вв. Среди известных мастеров итальянской майолики можно выделить семью Дела Роббиа, производивших декоративные изделия с яркими цветными глазуриями. Известные центры производства майолики существовали в Фаэнце, Урбино, Сиене, Умбрии.



Рис. 10.3. Терракотовые саркофаги. Предположительно XVIII в. до н. э., Греция (Археологический музей, Ираклион)



Рис. 10.4. Терракотовый сосуд, расписанный ангобами. IV в. до н. э., Греция (Музей керамики, Афины)

Наряду с майоликой появился и получил развитие фаянс, сначала глинистый, потом со значительной долей известковых компонентов. Особенно широко он был распространен на территории стран, вошедших в Османскую империю, и в Средней Азии.

Значительный прогресс в разработке фаянсовых составов и глазури к ним был достигнут в XVI–XVIII вв. в европейских странах (Франция, Нидерланды, Англия), что привело к появлению полноценного полевошпатного фаянса, не утратившего своей роли и используемого в производстве современной посуды и сувениров. Французский ученый Б. Палисси прославился разработкой цветных фаянсов в виде декоративных блюд (рис. 10.5).



Рис. 10.5. Блюда Бернара Палисси (Музей Виктории и Альберта, Лондон; Музей Гетти, Лос-Анджелес)

Важнейшим циклом в развитии сначала хозяйственно-бытовой и, гораздо позже, технической керамики стало начало производства фарфора, достигшего своего оптимального качества в Китае к VII в. н. э. В отличие от своих предшественников — пористых терракоты, майолики и фаянса, а также плотной, но склонной к деформации в обжиге каменной керамики, фарфор обладал выдающимися потребительскими свойствами — высокой прочностью, термостойкостью, белизной и просвечиваемостью в тонких слоях.



Рис. 10.6. Портлендская ваза. Джозайя Веджвуд, XVIII в. (Музей Виктории и Альберта, Лондон)

Его дефицитность и дороговизна объяснялась технологической изолированностью Китая на протяжении сотен лет. Однако появление фарфора на азиатском и европейском рынках подтолкнуло местных технологов к получению различных видов мягкого фарфора, твердого фаянса и каменной керамики, приближающихся по своим потребительским свойствам к китайским образцам. Значительных успехов в производстве качественной посуды достигли технологи Франции, Италии, Голландии и Англии.

Большую роль в развитии технологии керамики сыграл Дж. Веджвуд, совместивший в себе технолога, промышленника и художника. Его разработки масс для производства фаянса и каменной керамики получили мировую известность (рис. 10.6).

Первый европейский фарфор, подобный китайскому, был получен в Саксонии в начале XVIII в. Первые изделия были представлены в 1710 г. в г. Мейсене. Авторами изобретения европейского фарфора, отличавшегося по составу сырья от китайского, были И. Ф. Бетгер и недоживший до получения первых образцов В. Чирнгауз.

Начиная с середины XVIII в. европейский фарфор, производящийся на мануфактурах Мейсена, Берлина, Вены, Копенгагена и других, получил широкое распространение и занял прочное место, как материал для производства качественной посуды. Однако еще долгое время фарфор оставался слишком дорогим для большинства населения и его массовое производство началось только в XIX в.

Керамика сыграла важную роль в борьбе с инфекциями, распространявшимися в Европе со Средних веков вплоть до начала XX в. К этому времени фабрики, достигшие в результате промышленной революции высокой производительности, стали выпускать из глазурованного фаянса туалетные принадлежности для городских жителей среднего достатка, в скором времени составившие привычный нам набор: умывальный стол, унитаз и смывной бачок.

Керамические предметы для быта, кроме посуды для приготовления, хранения и употребления пищи, включали в себя многочисленные декоративные изделия — парфюмерные и аптекарские бутылки, вазы, игрушки, сувениры и т. п.

В России бытовая керамика выпускалась в виде терракотовых, а затем и майоликовых горшков и блюд, изготавливаемых с помощью гончарного круга. Наиболее оформившимися к XVII в. центрами гончарного производства стали Гжель и Скопин.

В нескольких российских губерниях было развито производство терракотовых игрушек, покрываемых после обжига мукой или известковым молоком, а затем расписываемых яркими красками.

Наиболее крупная мануфактура, выпускавшая майоликовую посуду и сувениры, была открыта А. Гребенчиковым в Москве в начале XVII в. и просуществовала около 50 лет.

В районе Гжели начиная с XVI в. последовательно и успешно развивались производства оригинальной майолики, полуфаянса, фаянса и, наконец, в XIX в. фарфора (рис. 10.7).

В России первый фарфор, не уступающий по своим характеристикам европейскому и китайскому, был получен в середине XVIII в. на Первой Императорской порцелиновой мануфактуре. Его производство организовал талантливый ученый Д. И. Виноградов, самостоятельно разработавший оригинальный рецепт.

Во второй половине XIX в. в России работали десятки предприятий по выпуску фарфора и фаянса, среди которых крупные заводы в Санкт-Петербурге, Дулеве, Вербилках, Конакове и других районах.



Рис. 10.7. Знаменитая гжельская роспись и посуда, XX в.

Промышленная революция в Европе позволила провести в течение XIX столетия специализацию производства фарфора с получением его технических разновидностей (изоляционного, химического, хозяйственного, санитарно-технического).

Зарождение технологии строительной керамики

Самым древним строительным материалом, изготавливаемым в значительных объемах, был кирпич-сырец, производимый из глины с добавками соломы, трав и пр. Из такого кирпича строили значительные сооружения, например крепости и башни в районах Ближнего и Центрального Востока. Кирпич-сырец обеспечивал сооружениям достаточно высокую прочность в условиях отсутствия дождей. Точная датировка начала использования обожженного керамического кирпича неизвестна, однако уже в VI в. до н. э. в Вавилоне наряду с кирпичом-сырцом для облицовки стен применяли глазурованные керамические кирпичи.

Массовое производство обожженного кирпича было налажено в Древнем Египте, в эпоху расцвета которого строили большие сооружения, требующие массового использования прочных строительных материалов наряду с дефицитным камнем.

Кирпичное производство успешно развивалось в эпоху Древней Греции и Рима. Из кирпича возводили не только стены домов, им мостили дороги. Клейменные кирпичи, производимые римскими легионерами для хозяйственных нужд армии на своих фабриках, находят в разных частях света, принадлежавших ранее Римской империи.

В странах исламской Азии из крупноформатных керамических блоков, изготовленных из материала кашан, строили мечети и мавзолеи, облицовывая стены и купола майоликой из цветных глазурей. Большие мозаичные поверхности и богато расписанные изразцы прославили архитектурные памятники XIV–XVI вв.

Со временем кирпичи меняли свои пропорции и размеры, но на огромных территориях от современных Испании до Китая тысячи лет из них строили прочные и долговечные здания. Особенно прославились возведенные с использованием кирпича католические соборы, построенные в эпоху Возрождения XIV–XVI вв.

В Киевской Руси из кирпича в XI–XII вв. были построены церкви в Киеве, Витебске, Гродно.

В России первый кирпичный завод был построен в Москве в середине XV в. До этого времени небольшие производства кирпичей и глазурованных керамических изразцов существовали при монастырях.

В конце XV в. кирпич, производство которого организовал итальянский архитектор Аристотель Фиораванти, использовали при строительстве московского Кремля. Размеры «аристотелева кирпича» (289×189×67 мм) приближались к размерам современного кирпича (250×120×65 мм), а качество превосходило прежнее.

Развитие российских кирпичных заводов, возникших в начале XVII в. вместе с некоторыми другими промышленными предприятиями, связывают с правлением Петра I. В городах России в это время появились первые кирпичные дома.

На протяжении долгого времени, вплоть до начала XX в., существовали маленькие, так называемые сезонные заводы, работавшие только летом, сушившие и обжигавшие формованный вручную кирпич примитивными способами.

Значительный прогресс в производстве кирпича был достигнут в середине XIX в., когда на фабриках стало массово внедряться современное для того времени производительное оборудование — помольные машины, смесители, экструдеры, кольцевые и, позже, туннельные печи.

Со второй половины XX в. кирпичные заводы стали выпускать строительные керамические пустотелые блоки больших форматов, обладающие высокими теплоизоляционными свойствами.

Наряду с кирпичом в строительстве зданий начиная с VII–V вв. до н. э. использовали керамическую черепицу, которая обеспечивала надежную и долговечную защиту крыш от осадков, жары и холода. Крыши, покрытые плоской и полукруглой черепицей, украшали здания городов древних греков, этрусков, римлян и других народов Средиземноморья. Торцевая черепица выполнялась в виде декоративных элементов — антификсов и превращала крышу в законченное архитектурное произведение.

В Средние века в Европе повсеместно была распространена полукруглая (желобчатая) черепица («монах-монашка»).

Многоскатные крыши храмов и дворцов средневековых Китая, Кореи и Японии покрывали глазурованной черепицей.

Для производства черепицы использовали такие же глины, что и для производства кирпича, но образующие с водой более пластичное тесто.

В наше время керамическая черепица по-прежнему распространена как кровельный материал для малоэтажного, в основном сельского, строительства практически во всех европейских странах (рис. 10.8).



Рис. 10.8. Здания с современной керамической черепицей (Староместская площадь, Прага)

Керамическая плитка представляет собой облицовочный материал с удачным сочетанием свойств — долговечностью и высокой декоративностью. Ее производство было основано на обжиге относительно тонких пластин, иногда фигурной формы, формованных ручной набивкой глиняной массы в деревянные или керамические формы. Сначала керамические плитки имели более декоративное значение и выпускались из терракоты с узорными рельефами, затем из майолики.

Глазурованные плитки из майолики были распространены в различные времена, большей частью в странах Востока — от Древнего Египта и Вавилона до средневековых стран арабского Халифата. Ими покрывали стены дворцов, храмов и мечетей, создавая неповторимые шедевры зодчества.

Из восточной традиции керамической облицовки родились европейские печные изразцы, распространенные в Германии и Голландии XVI–XVIII вв. Особенно прославилось производство фаянсовых изразцов, посуды и декоративных изделий в голландском г. Дельфте.

Плотнospеченная напольная керамическая плитка из каменной керамики производилась в г. Метлах (Германия). Ее качество было настолько признанным, что вплоть до середины XX в. плитки для облицовки полов часто называли метлахскими.

В России известные школы производства высокохудожественных изразцов были XVI–XVII вв. в мастерских монастырей в Великом Устюге, Ростове, Москве, гораздо позднее (с XVIII в.) производство изразцов по голландским образцам было открыто в г. Санкт-Петербурге (рис. 10.9).



Рис. 10.9. Керамические изразцы
(Музей архитектурной художественной керамики «Керамарх», Санкт-Петербург)

С развитием машинного производства керамические плитки стали изготавливать прессованием порошка в промышленных масштабах, использовали их в облицовке внутренних стен и полов промышленных зданий, а также ванных и туалетных комнат жилых городских домов.

Керамическая плитка зарекомендовала себя как долговечный и экологичный материал, поэтому ее производство в XX в. неуклонно росло. Начиная со второй половины XX в. производство керамической плитки перешло на скоростной обжиг и стало практически полностью автоматизированным.

На грани столетий стали выпускать фарфоровидные плитки повышенной прочности из каменной керамики (керамогранита), которые, благодаря своим свойствам, широко используются как в качестве напольного покрытия, так и в качестве облицовки внутренних стен и фасадов.

Зарождение технологии огнеупорных материалов

Необходимость в огнеупорных материалах возникла с появлением печей, для футеровки которых требовались огнеупорные материалы, способные выдерживать высокие температуры.

В бронзовый и затем железный века, пришедшие на смену неолиту, огнеупоры были необходимы для выплавки металлов. Печи строили из камней и глин, изделия из которых не деформировались при температурах до 1000–1200°С.

При переходе от допотопного кричного способа получения мягкого ковкого железа к более прогрессивному способу науглероженного более твердого железа уже в эпоху Древнего Рима, когда температура в печах достигла 1400°С, железо, используемое ранее лишь как драгоценный металл для редких изделий, получило большее распространение.

В Средние века, во многом благодаря работам алхимиков по получению «философского камня», была значительно улучшена технология плавки металлов, включая изготовление огнеупоров. Ямы или напольные горны для получения железа стали заменять небольшими шахтными печами — прообразом современных доменных печей. В XIV в. меха, используемые для поддува воздуха и поддержания высокой температуры, стали приводить в действие силой падающей воды, что позволило выплавлять чугун.

Со второй половины XVIII в. началось бурное развитие промышленности, в том числе и черной металлургии, появилось машиностроение, требующее большого количества металла. Был освоен процесс производства стальных отливок тигельным способом плавки стали. Возникло производство рафинированного железа в отражательной печи, оснащенной камерой горения на каменном угле (способ Хадера), и способ прокатки металлических листов. Все нововведения требовали совершенствования технологии огнеупоров, включая повышение их рабочей температуры.

Для футеровки доменных и отражательных печей для выплавки металла, стекловаренных печей, печей для обжига фарфора и цемента использовали жаропрочные камни и шамотные огнеупоры, изготавливаемые из огнеупорной глины, каолина, кварцевого песка. Основным сырьем для производства огнеупорных кирпичей была огнеупорная глина, выдерживающая без деформации температуры выше 1580°С.

Первое специализированное производство шамотных огнеупоров было организовано в Германии в 1810 г., однако их массовый выпуск начался в середине XIX в. в США.

В первой половине XIX в. был получен динасовый огнеупор на основе тридимита (устойчивая модификация кремнезема), использование которого эффективно в печах по выплавке стали и производству стекла. Динасовые огнеупоры были впервые изготовлены в 1822 г. в Великобритании (Уэльс).

В России огнеупоры, получаемые из смеси огнеупорной глины или каолина с отоштителем, начали производить с середины XVII в. При Петре I огнеупорные кирпичи производили в заметном количестве из гжельских подмосковных глин.

В России первый шамотный завод был построен в 1865 г. в г. Боровичи (Новгородская обл.); затем были построены шамотные заводы в Часов-Яре (1887), в Латной (1897) и др.

В России производство динаса было организовано в 80-х гг. XIX в.; тогда его выпускали на Обуховском заводе в Петербурге, на Пермских пушечных заводах, на Златоустовском металлургическом заводе и др. Первый специализированный завод — Деконский динасовый завод в Донбассе — был построен в 1889 г.

Доломитовые огнеупоры впервые были применены в Англии в 1878 г. Первые магнезитовые огнеупоры появились в Австрии (Штирии) в 1860 г., а промышленное их производство началось в 1882 г. В России первый магнезитовый завод построен на Урале в г. Сатка в 1900 г. (ныне ОАО «Комбинат «Магнезит»).

Хромитовые огнеупоры появились в конце XIX в. Естественный хромит как огнеупор применен в России на Александровском сталелитейном заводе в Петербурге в 1879 г.



Рис. 10.10. Современные огнеупоры из оксидной керамики

Безобжиговые хромомagneзитовые изделия были изготовлены в 1913 г. в США. Другие виды огнеупоров — карбидкремниевые, циркониевые и цирконовые, из чистых оксидов, углеродистые и т. п. — начали производить и применять только во второй половине XX в. (рис. 10.10).

Зарождение технологии технической керамики

Техническая керамика, если не считать абразивных камней, керамической аптекарской и лабораторной посуды и небольших тиглей для литья металлов, начала бурно развиваться со второй половины XIX в. с началом использования электричества в технике. Однако необходимо понимать, что техническое применение керамики, пусть и в ограниченных масштабах, было распространено во все времена, начиная с эпохи неолита. Так, в эпоху бронзы в III тыс. до н. э. из керамики на основе глин с различными добавками изготавливали формы, тигли и сопла для литья металлических изделий.

Таким образом, наиболее древним направлением в технической керамике были разработки термостойких и химически стойких материалов, использовавшихся в химической посуде, тиглях, футеровке химических реакторов и т. п. Для этой цели сначала применяли керамику на основе глин, затем, начиная с XVIII в., фарфор. Позже стали использовать керамику из чистых оксидов и бескислородных соединений.

Примером нового поколения химически стойкой керамики могла служить разработанная во второй половине XX в. прозрачная корундовая керамика, использовавшаяся в газоразрядных лампах с парами натрия.

Растущий выпуск металла со времен промышленной революции XVIII–XIX вв. требовал значительного количества абразивов для его обработки, которые стали изготавливать на основе керамических оксидных (оксид алюминия — корунд) и бескислородных (карбид кремния — карборунд) материалов. К основным абразивным изделиям относят шлифовальные и отрезные круги, резцы и буры. Керамические абразивные материалы дополняют, а иногда заменяют алмазные абразивы, поскольку имеют существенно меньшую стоимость.

Другим направлением использования технической керамики послужило развитие электротехники, а затем электроники. Прежде всего, это электроизоляторы, выпуск которых был начат с конца XIX в. сначала из твердого фарфора (являющегося до сих пор основным материалом для большинства изоляторов), а затем из оксидных и силикатных материалов (корунда, муллита, кордиерита, стеатита, волластонита и др. — рис. 10.11).

В качестве полупроводникового материала специального назначения керамику стали применять в варисторах и резисторах, использующихся в термочувствительных датчиках, в стабилизаторах и регуляторах напряжения.

Наряду с керамическими электроизоляторами из оксидов, керамику на основе карбида кремния и силицида молибдена и оксида циркония использовали как проводник для создания высокотемпературных нагревателей печей электросопротивления.

Сегнето- и пьезоэлектрическая керамика на основе титанатов и цирконатов бария стала активно использоваться в электронных приборах с середины XX в.

В конце XX в. начались интенсивные разработки сверхпроводящей керамики, позволяющей достигать эффекта сверхпроводимости при аномально высоких, по сравнению с известными соединениями, температур.

Также в XX в. развитие получила магнитная керамика на основе ферритов в качестве замены металлических магнитов, как не требующая перемагничивания.

Высокие прочностные свойства керамики, сохраняющиеся в условиях высоких температур, определили интерес к ней как к материалу для деталей газотурбинных и реактивных двигателей. Эти разработки были начаты в 70-е гг. XX в. и продолжаются до сих пор.

Большую роль стали играть керамические материалы в медицине, в первую очередь как биоинертные (на основе оксидов алюминия и циркония) и биоактивные (на основе фосфатов кальция) имплантаты, выступающие элементами костей и суставов.



Рис. 10.11. Образцы плотной керамики технического назначения на основе оксида алюминия

Благодаря особым функциональным свойствам техническая керамика широко используется практически во всех отраслях промышленности, в обзоре подробно представлены основные области применения, однако необходимо отметить, что в настоящее время известно достаточно много разнообразных и перспективных областей применения технической керамики, описание которых не вошло в данную статью.

ЭВОЛЮЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ И ЦИКЛЫ РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Из-за многообразия областей использования керамики и ее широкой распространенности четко выделить исторические циклы развития технологии весьма непросто. В древности практически каждая из существовавших продолжительное время цивилизаций развивала технологию керамики, использовавшейся в быту, строительстве, для получения металла, стекла и других материалов, требующих применения высоких температур. На основе обнаруживаемых минералов, прежде всего глинистых, разрабатывались рецепты смесей, совершенствовались способы формования и обжига. Большая часть этих рецептов и многие достижения древности остались нам неизвестны.

Причины зарождения технологии керамики тесно связаны с началом использования огня как источника тепла и средства обработки пищи. С началом использования костров и очагов

были обнаружены уникальные свойства глины — приобретать после обжига высокую твердость и не размокать при контакте с водой. Несмотря на то что наиболее древние найденные керамические изделия представляют собой женские фигурки, вероятно используемые в ритуальных целях, впервые из керамики стали изготавливать посуду для приготовления и хранения пищи.

По оставшимся источникам и артефактам можно выделить следующие вехи в развитии технологии (табл. 10.1, рис. 10.12):

- Разработка основ технологии керамики из терракоты, включая обогащение сырья, его измельчение и смешивание, формование способом лепки, сушку и обжиг в кострах и примитивных очагах. Этот цикл имел значительные временные рамки и занимал часть эпохи неолита.
- Начало использования гончарного круга как одного из первых производительных механизмов, позволявших в больших количествах производить сосуды совершенных форм. IV–III тыс. до н. э.
- Появление глазурованных изделий, не только улучшивших декоративные свойства изделий, но и их стойкость. Речь идет о древней майолике, фаянсе и других керамических материалах, производившихся в эпоху расцвета Древнего Египта, Ассирии, Вавилона. Начало производства — с IV тыс. до н. э., расцвет древней майолики — I тыс. до н. э.
- Появление изделий из каменной керамики, отличающейся высокой плотностью, прочностью и требовавшей тщательного подбора сырья и обжига при повышенной температуре (более 1100°С). II–I тыс. до н. э.
- Появление в Древнем Китае протофарфора и фарфора, превосходившего по своим свойствам все известные ранее керамические материалы. Использование высококачественного обогащенного сырья (каолинов, фарфоровых камней) и совершенных печей с температурой обжига выше 1100°С. VII в. н. э.
- Разработка фарфороподобных материалов — твердого фаянса и различных видов мягкого фарфора и каменных масс, позволивших изготавливать высококачественные бытовые изделия. XV–XVIII вв.
- Начало механизации производства керамики, появление европейского фарфора и его распространение в различные области хозяйства. XVIII в.
- Значительный прогресс в оборудовании для производства керамики, появление высокопроизводительных способов формования (экструзии, прессования), кольцевых и туннельных печей. Начало массового выпуска огнеупоров, разработка материалов технической керамики. XIX в.
- Бурное развитие конструкционной и функциональной керамики различного назначения от машиностроения до атомной промышленности и космоса. Значительное расширение области составов сырья для производства керамики. Развитие химических способов получения порошков для производства керамики. Появление специальных способов формования технической керамики — изостатического прессования, инжекционного формования, пленочного литья и др. Повышение температур обжига в специальных печах до 2000°С. XX в.
- Начало современного цикла развития технологии керамических и керамоматричных материалов с использованием нанопорошков. Конец XX — начало XXI в.

Научно-технический этап такой древней технологии, как производство керамики, вплоть до XIX в. складывался как долгий и далеко не всегда систематический поиск рецептур материалов, способ подготовки исходных материалов, формования и обжига. Так, в самом начале производства терракоты столетиями нарабатывали основы технологии: выбор вида глины, обладающей хорошими формовочными, сушильными и обжиговыми свойствами; внесение в нее добавок, улучшающих свойства; измельчение и смешивание компонентов; совершенствование техники лепки, строительство обжиговых печей.

Таблица 10.1. Хронология появления керамических материалов, способов формования и обжига

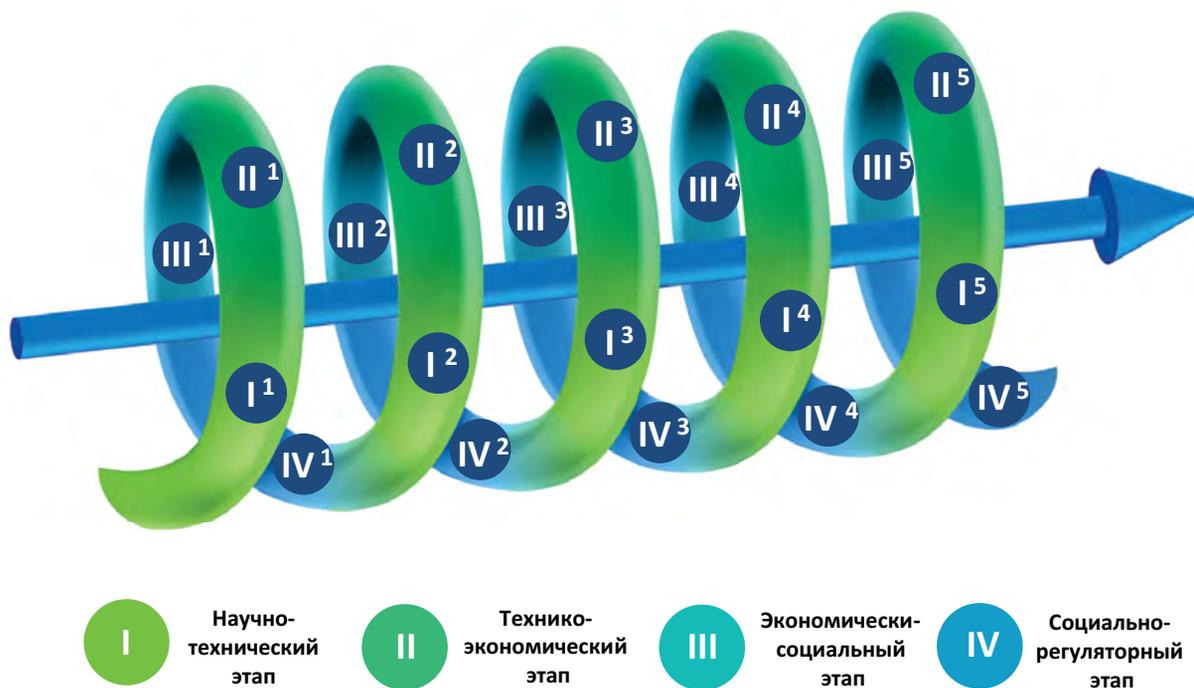
Период	Прогресс в технологии формования	Прогресс в технологии обжига	Прогресс в создании керамических материалов
XXIV в. до н. э.	Ручная лепка	Обжиг при температуре костра — не более 800°С	Первые керамические фигурки из терракоты (Европа)
XX–VIII вв. до н. э.	Ручная лепка		Адобы — высушенные кирпичи-сырцы (Ближний Восток)
VI в. до н. э.	Использование деревянных и керамических форм для отминки изделий (Месопотамия, Египет)	Обжиг в печах с температурой около 1000°С	Первые огнеупорные материалы из обожженной глины и камня
IV в. до н. э.	Появление гончарного круга (Месопотамия)		Использование керамического кирпича в строительстве (Месопотамия). Майолика — первые глазурованные изделия (Египет)
III в. до н. э.			Керамическая черепица (Греция)
II в. до н. э.			Использование высокощелочных глазурей в архитектурной майолике (Ближний Восток)
X в. до н. э.		Обжиг в печах с температурой около 1200°С	Глазурованная каменная керамика (Китай)
III в. до н. э.		Обжиг в больших печах с температурой выше 1200°С	Белые тонкокаменные изделия — протофарфор (Китай)
I в. до н. э.			Использование свинцовосодержащих глазурей (Ближний Восток, Китай)
VII в.		Обжиг в больших печах с температурой выше 1300°С	Твердый фарфор (Китай)
IX–XII вв.		Печи с двойными стенами для обжига надглазурных препаратов	Подглазурные и надглазурные препараты (люстры) для декорирования керамики (Персия, Китай)
X в.			Фриттовый фаянс (Египет)
XVI–XVII вв.			Мягкий фарфор (Европа)
XVIII в.	Шликерное литье в гипсовые формы. Начало механизации производства (Европа). Декорирование деколями	Печи с температурой выше 1300°С	Твердый европейский фарфор (Германия). Костяной фарфор (Англия)
XIX в.	Формование керамических изделий штамповкой, экструзией (протяжкой), прессованием	Кольцевые печи. Первые туннельные высокопроизводительные печи	Массовое производство огнеупоров. Начало производства технической керамики (электроизоляторов, абразивных керамических материалов и пр.). Получение искусственного сырья (оксидов, карбидов, нитридов) для производства технической керамики

Период	Прогресс в технологии формования	Прогресс в технологии обжига	Прогресс в создании керамических материалов
1940-е гг.	Горячее парафиновое литье (СССР)		Керамические конденсаторы и магниты
1960-е гг.	Изостатическое прессование. Шелкографическое декорирование плиток	Горячее прессование (ГП) и горячее изостатическое прессование (ГИП) в специальных прессах и газостатах соответственно	Керамическая броня
1970-е гг.	Формование высококонцентрированных керамических вяжущих суспензий (ВКВС)	Технология скоростного обжига плитки	Керамические детали двигателей. Биоактивные керамические импланты
1980-е гг.	СВС-компактирование. Взрывное прессование	Широкое использование эвтектик для снижения температуры обжига технической керамики	Керамические сверхпроводники. Поризованные керамические строительные блоки. Прозрачная керамика
1990-е гг.	Шликерное литье под давлением в пластиковые формы. 3D-печать керамики. Декорирование плиток ротационной печатью (ротоколор)	SPS-спекание (электроискровое) под действием давления, внешнего нагрева и многократных импульсов электрического тока	Керамогранитные плитки. Керамические блоки, наполненные минеральной теплоизоляцией
2000-е гг.	Стереолитографическая 3D-печать сложнопрофильных изделий. Формование тонких керамических плит прокаткой	FLASH-спекание под действием внешнего нагрева и низкочастотного или постоянного электрического поля	Выпуск широкоформатных (более 1 м) плит из керамогранита. Керамоматричные композиты для авиации и космоса

Наряду со строительными материалами, такими как сырцовые и обожженные кирпичи, была востребована керамическая посуда, производство которой сдерживалось сложностью формования полых тонкостенных изделий, которые требовались в большом количестве. Поэтому изобретение гончарного круга ознаменовало новую страницу в технике формования, благодаря которой терракотовая посуда совершенных форм распространилась на большей части Средиземноморья, Ближнего и Среднего Востока, Индии и Китая.

Несмотря на высокий уровень гончарного мастерства терракотовые изделия отличались пористостью, что сказывалось на их прочности и долговечности, и в большинстве своем имели невысокие декоративные свойства. Появление глазурованной майолики и затем фаянса позволило поднять уровень свойств как строительной, так и бытовой керамики, увеличить прочность плиток, обеспечить гигиеничность посуде, значительно разнообразить декор изделий.

Следующим качественно новым циклом стало начало производства фарфора — материала, значительно превосходившего по своим свойствам все известные до этого времени виды керамики. После его появления области применения керамики расширились. Фарфор оказался первым изоляторным материалом и, наряду с некоторыми видами химически стойкой керамики, стал использоваться для технических целей.



- | | |
|---|---|
| I¹ — первые терракотовые фигурки | I⁴ — появление фарфора |
| II¹ — появление керамической посуды | II⁴ — посуда и изделия из твердого и мягкого фарфора |
| III¹ — появление первых печей для обжига керамики | III⁴ — разработка составов и оборудования для массового выпуска керамики |
| IV¹ — необходимость увеличения производительности формования изделий | IV⁴ — необходимость разработки составов для технического применения керамики |
| I² — появление гончарного круга | I⁵ — появление технической керамики |
| II² — терракотовая керамика бытового и строительного назначения | II⁵ — керамика для электротехники, машиностроения |
| III² — массовый выпуск керамических сосудов, кирпича, черепицы | III⁵ — разработки высокопроизводительных технологий формования и обжига |
| IV² — необходимость защиты и декорирования поверхности изделий из пористой керамики | IV⁵ — необходимость разработки энергоэффективных технологий изделий массового выпуска и керамоматричных композитов для экстремальных температур и условий |
| I³ — появление глазурей | |
| II³ — глазурованные сосуды и плитки из майолики и фаянса | |
| III³ — архитектурная и бытовая керамика | |
| IV³ — необходимость повышения температуры обжига для увеличения прочности изделий | |

Рис. 10.12. Эволюция технологий производства керамических материалов

Новый цикл развития технологии керамики был связан с разработками материалов специализированных составов как оксидных, так и бескислородных соединений для нужд различных отраслей промышленности — от машиностроения (абразивы, конструкционная керамика) до электроники и медицины. Разнообразие требуемых свойств обеспечивалось не только использованием различных составов материалов, но разработкой специальных способов формования и обжига. Эти процессы, активно развиваемые во второй половине XX в., получили новые импульсы в начале XXI столетия. Керамика и керамоматричные композиты служат материалом для работы в экстремальных условиях высоких температур и ударных нагрузок, используются в качестве биоактивных костных имплантов и сверхпроводников.

Прогресс в технологии керамики связан, прежде всего, с прогрессом в обжиге изделий. Долгое время печи для обжига керамики представляли собой массивные сооружения, сложенные из огнеупорного кирпича (горны), отапливаемые дровами, углем и, в последние 50 лет, газом.

Переход от газовых горнов к камерным печам с тонкостенной огнеупорной футеровкой, автоматизированным управлением режимом обжига, механизированной разгрузкой и выгрузкой обжигаемых изделий был связан с разработкой эффективной волокнистой теплоизоляции и совершенствованием составов керамики.

Ручной труд на операциях по перемещению полуфабриката на многих производствах заменен автоматизированными комплексами — транспортерами с устройствами разгрузки-выгрузки и роботами. Особенно эффективно использование роботов в садке и разгрузке кирпича, а также на вредной для здоровья работников операции глазурования санитарно-технических изделий (рис. 10.13).



а

б

Рис. 10.13. а) транспортировка фарфоровых полуфабрикатов на обжиг (первая половина XX в.); б) роботы для садки / разгрузки кирпича на вагонетки (XXI в.)

В технологии декорирования наибольший прогресс наблюдается в производстве керамических плиток, где повсеместно используют цифровую печать, тогда как художественная роспись посуды, отличающейся большим разнообразием форм и декоров изделий, осуществляется по-прежнему вручную (рис. 10.14).

Способ формования раскаткой — самый древний пример механизации. Гончарный круг, пусть и оснащенный электродвигателем, до сих пор пользуется популярностью среди художников-керамистов, тогда как на предприятиях по выпуску керамической посуды последние 50 лет используют полуавтоматы и автоматизированные линии (рис. 10.15).



а

б

Рис. 10.14. От ручной росписи художественных изделий пока отказаться нельзя: а) нанесение декора, первая половина XX в.; б) начало XXI в.

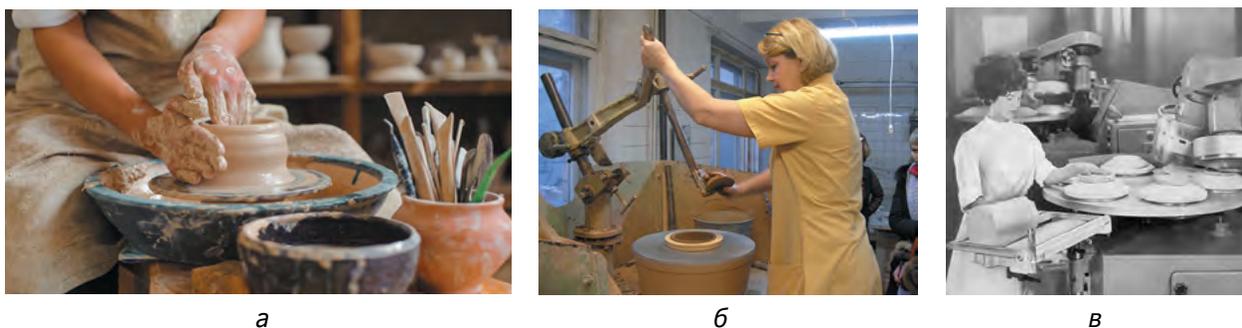


Рис. 10.15. В технологии хозяйственно-бытовой и художественной керамики используют оборудование разных эпох: а) гончарный круг; б) станок для раскатки шаблоном; в) полуавтомат для раскатки роликом

Механизирував процесс шликерного литья в гипсовые формы в производствах крупногабаритных санитарно-технических изделий, удалось избавиться от большинства трудоемких ручных операций, а при использовании литья под давлением в пластиковые формы — полностью автоматизировать процесс (рис. 10.16).



Рис. 10.16. Производство санитарно-керамических изделий: литье под давлением в полимерные формы на прессе-автомате

ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Технология керамики включает в себя три основные стадии (рис. 10.17–18): **подготовку формовочной массы, формование и обжиг**. Для формования изделий используют пресс-порошок из гранулированных зерен компонентов сырья с низким содержанием связки — 3–10% (прессование), пластическую массу (содержание связки 15–25%) или шликер (суспензию измельченных частиц в воде) с содержанием дисперсионной среды от 25 до 50%. Выбор способа формования определяется формой изделия: так, полые изделия формуют преимущественно шликерным литьем, протяженные изделия постоянного сечения — протяжкой пластической массы (экструзией), изделия простой формы — прессованием. Каждый из способов формования имеет несколько разновидностей, что позволяет добиться лучшего качества изделий определенной формы.

В зависимости от способа формования различается способ подготовки массы, обязательно включающий в себя измельчение компонентов сырья с последующей сепарацией по размерам (обычно с преобладанием фракций менее 100 мкм) и смешиванием для придания массе однородности.

Распространен мокрый способ подготовки формовочной массы с измельчением и смешиванием в водной среде, который позволяет добиться эффективного помола и хорошей однородности. Однако для придания массе пластичности или ее гранулирования при этом способе много энергии затрачивается на обезвоживание.

Сухой способ подготовки сырья заключается в сухом (без добавления воды, а нередко и их предварительной сушке) измельчении компонентов сырья с последующим дозированием связки (воды). Способ требует тщательного пылеудаления.

Для большинства технологий используется также магнитная сепарация для удаления примесей железосодержащих соединений.

Для удаления избытка воды из формованных полуфабрикатов их перед обжигом подвергают сушке, обычно конвекционным способом, обдувая нагретым воздухом. В печь поступают изделия с низкой влажностью (менее 1%).

Основные энергозатраты в технологии керамики связаны с высокотемпературным обжигом. Формованные изделия обжигают в туннельных или камерных печах, обогреваемых природным газом, реже электричеством (рис. 10.17). Для прохождения необходимых физико-химических процессов фазообразования и спекания обжигаемого материала требуются значительные температуры (от 900 до 2000°С) и время (от 1 до 100 часов). Для большинства широко производящихся керамических материалов обжиг проводят при температурах 1000–1500°С, при этом полный цикл обжига занимает 16–24 часа.

Для ряда керамических материалов (плитка, сантехника, посуда и пр.) требуется нанесение слоя глазури и разного вида декоров, которые закрепляются в обжиге, поэтому для таких материалов используют два или три последовательных обжига.

Некоторые керамические материалы подвергают послеобжиговой обработке — шлифовке, полировке, нанесению металлизации, также требующей дополнительного обжига, и другим операциям.



а



б



в



г

Рис. 10.17. Современные печи для обжига керамики: а) туннельная для обжига кирпича; б) роликовая для обжига плитки; в) туннельная для обжига санитарных керамических изделий; г) камерная для обжига посуды

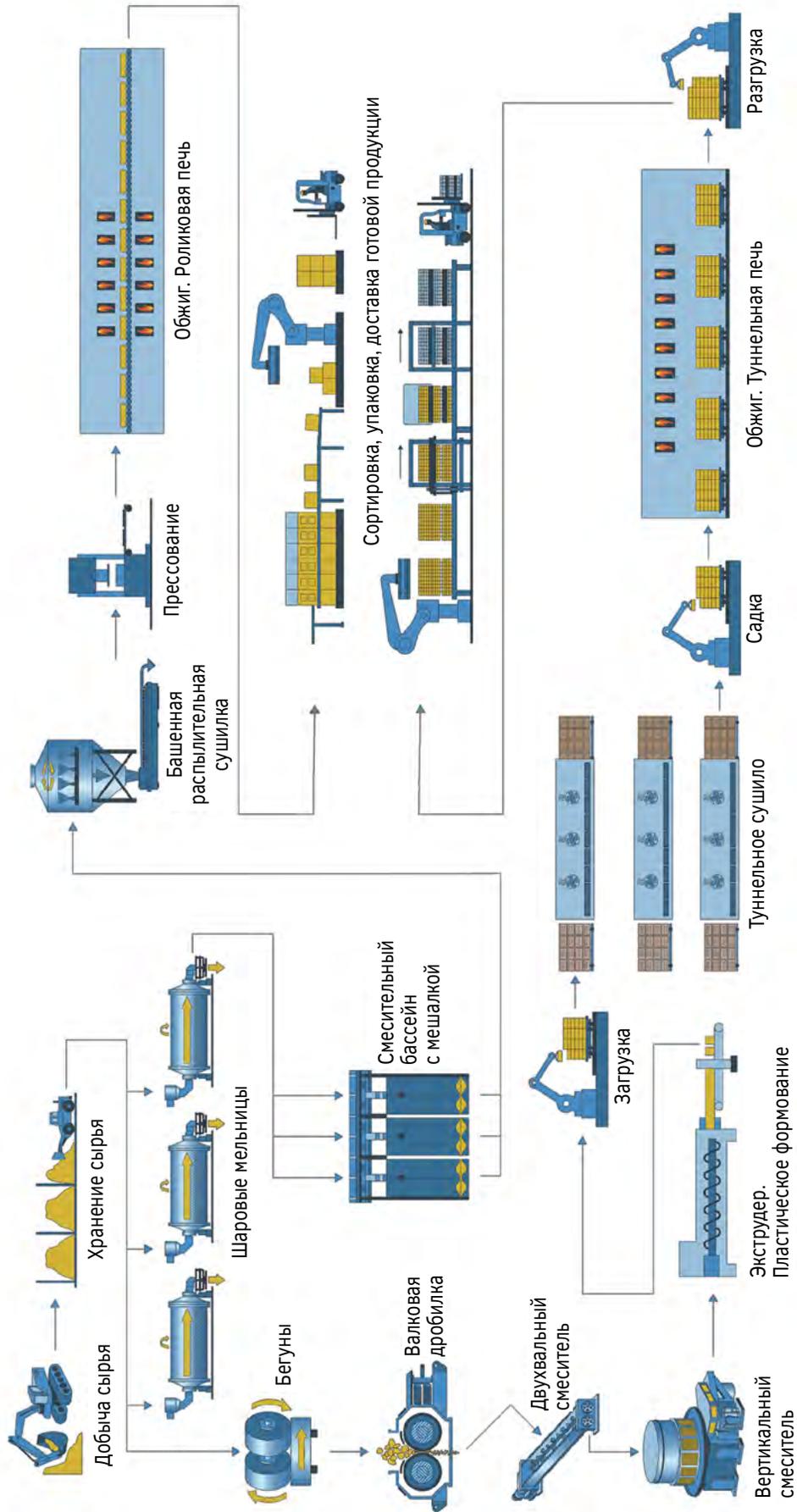


Рис. 10.18. Производство керамических материалов

На приведенной здесь схеме (рис. 10.18) показаны процессы производства керамической плитки (условная технологическая схема производства керамической плитки однократного обжига для облицовки пола (неглазурованная плитка для пола, керамогранит)) и кирпича. Первым этапом в обеих технологиях служит этап измельчения и смешивания добытого минерального сырья (глин, кварцевого песка и добавок). Для производства плитки характерен мокрый способ подготовки сырья (помол в шаровых мельницах в водной среде) с последующей грануляцией в башенных распылительных сушилках. Для производства кирпича процесс подготовки сырья проходит измельчением в валковых дробилках со смешиванием и корректировкой влажности в лопастных смесителях. Формование представлено способами прессования плитки из пресс-порошка и экструдированием пластичной массы с последующей резкой на заготовки кирпича.

Сушку и обжиг изделий проводят в конвейерных и туннельных сушилах и печах для плитки и кирпича соответственно.

СОСТОЯНИЕ ОСНОВНЫХ ПОДОТРАСЛЕЙ ПРОИЗВОДСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В СОВРЕМЕННОЙ РОССИИ

На рис. 10.19 представлена карта расположения наиболее крупных производств керамических изделий по различным видам материалов. Необходимо отметить, что средние и мелкие производства разного вида керамического кирпича, бытовых изделий и пр. имеются во всех без исключения регионах страны, однако расположение крупных производств приближено к рынкам сбыта. Очевидно, что с возрастанием роли в жизни страны Дальнего Востока и северных территорий в этих областях в скором времени появятся более крупные заводы.

Кирпич

Современные производства керамических изделий распределены по разным отраслям промышленности. Наиболее массовое и консолидированное производство керамики — производство строительной керамики, прежде всего, керамического кирпича. В России насчитывается несколько сотен предприятий, выпускающих керамический кирпич.

Помимо рядового кирпича нормального (1 НФ — 250 × 120 × 65 мм) формата полнотелого или пустотелого с повышенными теплоизоляционными свойствами все больше предприятий выпускают пустотелые строительные блоки значительных форматов. На ряде предприятий налажен выпуск строительных керамических блоков с размещенной внутри них минеральной изоляцией, что значительно уменьшает теплопроводность кладки.

Отдельным сегментом в производстве керамического кирпича можно представить выпуск клинкерного кирпича, полнотелого, повышенной плотности и прочности. В последнее время этот сегмент активно развивается из-за повышения спроса на качественный лицевой кирпич с высокими декоративными свойствами и дефицитностью подобной продукции отечественного производства.

Данная подотрасль представлена десятком ведущих предприятий значительной производительности (от 100 до 240 млн шт. условного кирпича в год), еще десяток производств имеет производительность от 40 до 100 млн шт. в год), остальные более мелкие предприятия выпускают от 10 до 40 млн шт. в год.

Крупнейшими производителями кирпича на территории Российской Федерации являются:

- предприятия группы ЛСР (совокупный годовой выпуск до 450 млн шт. условного кирпича);
- предприятия группы «Винербергер Кирпич» (совокупный годовой выпуск до 450 млн шт. условного кирпича).

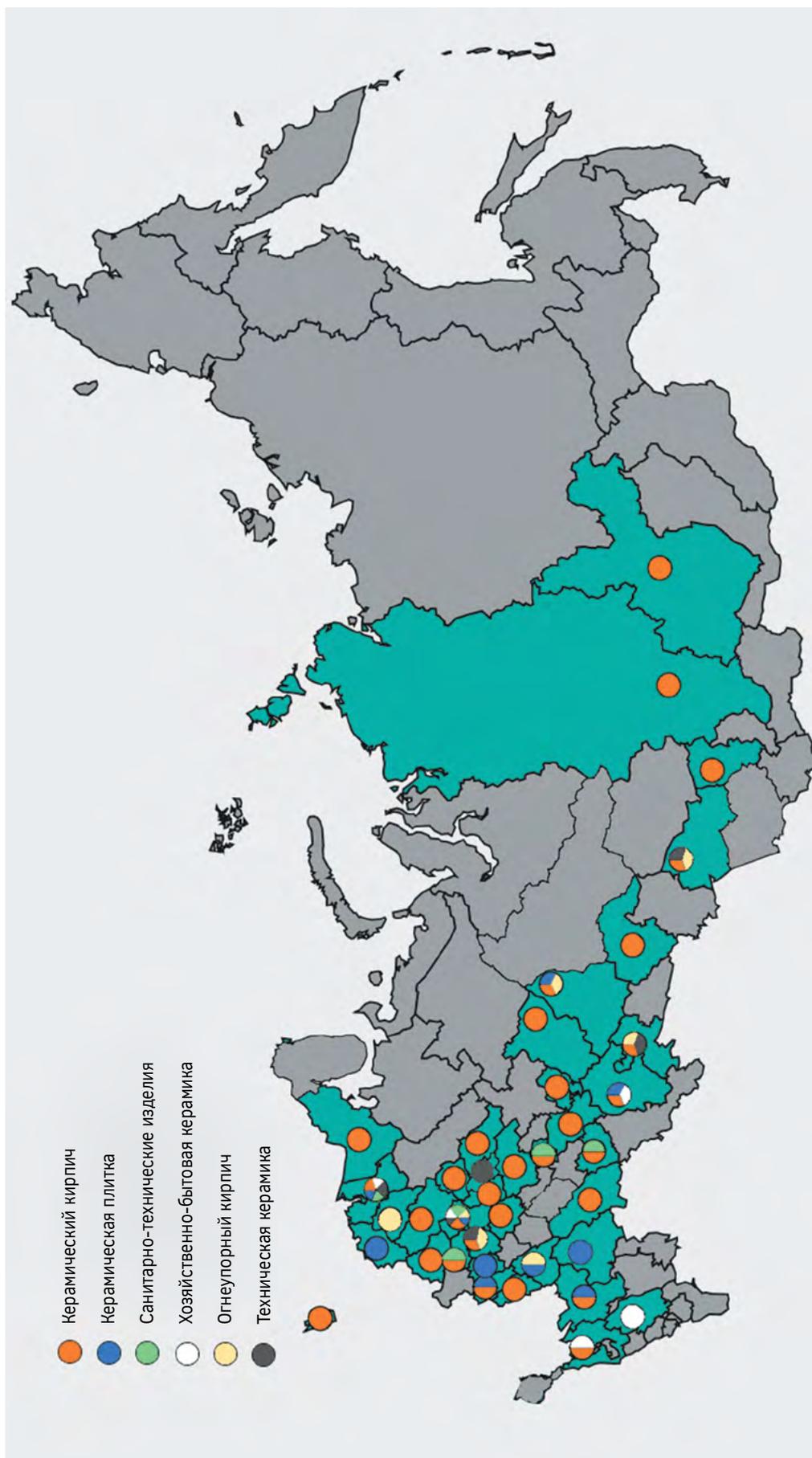


Рис. 10.19. Карта-схема распределения предприятий по выпуску керамики на территории Российской Федерации

К числу крупнейших заводов по выпуску кирпича в Российской Федерации относятся также предприятия группы BRAER (до 140 млн шт.), «Голицынский керамический завод» (до 120 млн шт.), заводы «Керма», ОСМиБТ, «Мстера» и некоторые другие, выпускающие около 100 млн шт. условного кирпича в год.

Техническое перевооружение в последние 20 лет прошло в основном на крупных заводах и почти не затронуло мелкие предприятия. Значительную негативную роль сыграл кризис 2008 г., сильно ослабивший строительство и, соответственно, производство строительных материалов.

Современный завод по выпуску кирпича представляет собой предприятие, базирующееся рядом с источником основного сырья (глиняным карьером), с развитой транспортной и энергетической инфраструктурой и высоким уровнем автоматизации производственных процессов. Предприятие обычно включает в себя открытую площадку для хранения запаса глины, закрытый склад сырьевых компонентов, участок переработки сырья, шихтозапасник, линию формования, участок сушки и обжига, участок сортировки готовой продукции и склад.

Основными агрегатами, работающими на производстве кирпича, являются дробилки различной конструкции (в основном валковые), экструдеры, туннельные или камерные сушилки, туннельные печи. В качестве источников энергии для сушки и обжига используют магистральный природный газ, механическое оборудование работает на электроэнергии. Доля воды, используемой в производстве, невелика. Вода используется в основном для увлажнения массы до формовочной влажности (16–20%).

Керамическая плитка

Производством керамической плитки в России занимаются более двух десятков предприятий, выпускающих от 2 до 10 млн м², характеризующихся высоким уровнем автоматизации, и некоторые более мелкие предприятия. Выпускается плитка различных форматов в основном двух видов — плитка для внутренней облицовки стен и для облицовки полов. В выпускаемом ассортименте постоянно растет сегмент универсальной керамогранитной плитки, которая используется как для облицовки стен и пола зданий, так и для облицовки фасада. Прежде всего, керамогранитная плитка используется для облицовки полов.

Среди крупнейших производителей керамической плитки и керамогранита на территории Российской Федерации (10 млн м² и более) — иностранные компании Kerama Marazzi (Италия), Cersanit (Польша), Gruppo Concorde (Италия); российские производители UNITILE (более 20 млн м²), Estima Ceramica (более 14 млн м²), «Завод керамических изделий» (Урал-керамика) (8,5 млн м²), «Евро-Керамика», «Кировская керамика» (4,5 млн м²), «НЕФРИТ-КЕРАМИКА» и др.

Современный завод по выпуску керамической плитки представляет собой предприятие с развитой транспортной и энергетической инфраструктурой и высоким уровнем автоматизации производственных процессов. Предприятие обычно имеет закрытый склад сырьевых компонентов, участок переработки сырья, участок получения пресс-порошка, автоматизированную линию, включающую в себя участки формования, сушки, глазурирования, обжига и сортировки, участок приготовления глазури и средств декорирования, склад. В производствах плитки для внутренней облицовки стен в состав предприятия входит участок третьего обжига, на котором выпускаются декоративные элементы — бордюры и вставки.

Основными агрегатами, работающими на производстве керамической плитки, являются шаровые мельницы, пропеллерные и лопастные мешалки, башенные распылительные сушилки, автоматизированные линии с гидравлическими прессами, роликовыми сушилками и печами. В качестве источников энергии для сушки и обжига используют магистральный природный газ, механическое оборудование работает на электроэнергии. Доля воды, используемой в производстве, достаточно велика. Вода используется для приготовления массы и глазури (влажность 40–50%).

Санитарно-технические изделия

Производством санитарно-технических изделий занимаются примерно 15 предприятий, работающих на привозном сырье и приближенных к рынкам сбыта.

Наиболее крупными предприятиями по выпуску санитарно-технических изделий в Российской Федерации, выпускающими до 2 млн изделий в год, являются предприятия, входящие в компанию ROCA GROUP («УграКерам», «Керамика», «САНТЭК», «Рока Сантехника»), «Кировская керамика», «Самарский Стройфарфор». На рынке также присутствуют «Ногинский стройфарфор», «Лобненский завод строительного фарфора», «Завод керамических изделий», «Волгоградский керамический завод» и некоторые другие.

Из-за широкого и часто меняющегося ассортимента на производствах используют технологию шликерного литья в гипсовые формы. Для производства сантехники эта технология считается устаревшей, так как не может обеспечить высокую производительность для таких толстостенных изделий при небольших затратах. Однако такой способ по-прежнему применяется повсеместно из-за необходимости большей гибкости при смене ассортимента и оправдывает себя при выпуске относительно небольших партий изделий.

Керамические санитарно-технические изделия включают в себя унитазы, писсуары, биде, смывные бачки, умывальные столы, пьедесталы, душевые поддоны и некоторые другие изделия, используемые в ванных комнатах. Основным материалом — санитарно-технический фарфор, имеющий комплекс свойств, подобных свойствам твердого хозяйственного фарфора, но получаемый при более низкой температуре обжига (1220–1250°С вместо 1380–1420°С).

При производстве сантехники хорошо зарекомендовал себя гораздо более высокопроизводительный по сравнению с традиционным литьем в гипсовые формы способ формования — шликерное литье под давлением в пористые формы из пластика. Сокращение времени цикла формования для санитарно-технических изделий до 15–30 минут, вместо нескольких часов и его полная автоматизация при улучшении качества полуфабриката позволяет вывести производство на другой технологический уровень. Основным недостатком такой технологии формования — дороговизна оборудования и применяемой формовочной оснастки, что требует уделять большое внимание маркетингу производимого ассортимента.

В составе завода по производству керамических санитарно-технических изделий работают: закрытый склад сырьевых компонентов, участок приготовления шликера, участок литья изделий, участки приготовления и нанесения глазури, участки сушки, обжига, участок лочки (устранения дефектов глазури), участок сортировки, участок оснащения арматурой и склад готовой продукции.

Основное оборудование: шаровые мельницы для тонкого помола сырья, пропеллерные и лопастные мешалки для приготовления шликера, литейные механизированные стенды с гипсовыми формами, автоматы для литья под давлением в пластиковые формы, камерные сушилки, туннельные и камерные газовые печи для обжига (рис. 10.18).

Хозяйственно-бытовая керамика

Производство хозяйственно-бытовой керамики сосредоточено на более чем 20 предприятиях, выпускающих посуду (из них три крупных). Все предприятия приближены к рынкам сбыта и находятся вблизи крупных населенных пунктов.

Среди крупных производителей посуды компании «Дулевский фарфор», «Башкирский фарфор», «Императорский фарфоровый завод», «Мануфактуры Гарднеръ в Вербилках», «Кубаньфарфор», «Кисловодский Фарфор — ФЕНИКС», «Гжельский фарфоровый завод», «Объединение Гжель».

Используемые на производствах посуды и сантехники технологии объединяет многокомпонентное, в основном привозное сырье, в состав которого входят 4–6 высококачественных

компонентов для производства фарфора. Производства оснащены высокотемпературными газовыми печами.

Производство посуды характеризуется очень широким ассортиментом, в котором большую часть представляют собой полые изделия (чашки, бокалы, чайники и пр.). Плоскую посуду (тарелки, блюда, блюдца) формуют достаточно производительным способом раскатки пластичной массы на полуавтоматах и автоматизированных линиях (см. рис. 10.15).

Еще одной особенностью выпуска посуды и сувенирного ассортимента является высокая доля декорированных изделий, что требует значительных затрат дорогостоящих препаратов для декорирования (глазурей, красок и пр.) и проведения многократных обжигов, что значительно удорожает производство. Предприятия по выпуску посуды и сувениров имеют весьма различную производительность — из них первую пятерку составляют предприятия с богатой историей, выпускающие полный и традиционный ассортимент посуды, тогда как остальные представляют собой достаточно мелкие производства, иногда специализирующиеся на изделиях традиционных народных промыслов или на отдельном сегменте посудного или сувенирного ассортимента. Материалы, из которых производят посуду и сувениры, помимо широко представленного фарфора — фаянс, майолика и каменная керамика. При выпуске майолики и каменной керамики производства ориентированы в большей степени на местное глинистое сырье, что снижает издержки производства наравне с меньшей температурой обжига (от 950 до 1250°С). Однако свойства посуды из этих материалов уступают свойствам фарфоровой посуды.

При производстве посуды практически повсеместно используется ручной труд, например в живописном цехе (рис. 10.14).

Обычно в составе завода по производству керамической посуды работают закрытый склад сырьевых компонентов, массозаготовительный участок приготовления пластичной формовочной массы и шликера, участок литья и формовки, участок сушки и обжига, участок декорирования и декорирующего обжига, участки приготовления и нанесения глазури, живописный цех, гипсомодельный участок, участок сортировки и упаковки, склад готовой продукции.

Основное оборудование данного производства: шаровые мельницы для тонкого помола сырья, пропеллерные и лопастные мешалки для приготовления шликера, фильтр-прессы для обезвоживания шликера, вакуум-мялки для приготовления пластичной массы, литьевые механизированные стенды, полуавтоматы или автоматизированные линии для формования плоской посуды, камерные сушилки, камерные или туннельные газовые печи для обжига.

Огнеупорные материалы

Заводы по выпуску огнеупорных изделий сосредоточены вблизи источников огнеупорного сырья (6 наиболее крупных производителей и 20 более мелких), отличаются широким ассортиментом и являются достаточно производительными. Огнеупорная продукция представлена как модульными изделиями простой формы (кирпичи, блоки), так и разнообразными изделиями сложной формы, используемыми в высокотемпературных агрегатах различных отраслей промышленности (металлургии, химической промышленности, производств цемента, керамики, стекла и пр.). Отсюда большое разнообразие составов огнеупоров (шамотные, алюмосиликатные, оксидные, карбидкремниевые и т. д.) и способов формования изделий (прессование порошков, штамповка и экструзия пластичной массы и шликерное литье).

Крупнейшие предприятия по выпуску огнеупоров — «Группа «Магнезит», «Огнеупоры» (г. Богдановичи), «Первоуральский динасовый завод», «Семилукский огнеупорный завод», «Боровичевский комбинат огнеупоров», «Первоуральский динасовый завод» (ДИНУР).

В составе завода по выпуску огнеупоров работают открытый и закрытый склад сырья, цеха по приготовлению формовочной массы (порошка, шликера), участки формования, сушки, обжига, склад готовой продукции.

Основное используемое оборудование: дробилки, бегуны, мельницы, оборудование для сепарации (ситы, сепараторы), разнообразные смесители, формовочное оборудование (пресса, экструдеры), камерные сушилки, туннельные и камерные печи.

Техническая керамика

Производство технической керамики характеризуется многообразием областей применения изделий и, соответственно, составов и технологий. Типовыми примерами технической керамики являются керамические изделия электротехнического назначения — от фарфоровых электроизоляторов до пьезоэлементов. Количество предприятий, занимающихся производством технической керамики, оценить сложно, большинство относится к малым предприятиям. Так, производством электроизоляторов занимаются около 20 заводов.

В числе крупных предприятий, выпускающих техническую керамику: «Гжельский завод «Электроизолятор», «Речицкий фарфоровый завод», «Донской завод радиодеталей», «ПОЛИКОР», «Вириал», «Южноуральский завод радиокерамики», «НЭВЗ-Союз». В этой области работают еще около трех десятков предприятий, в том числе в составе крупных предприятий другого профиля.

Технология технической керамики использует высококачественное сырье (в основном специально синтезированные химическими методами ультрадисперсные порошки), разнообразные способы переработки, формования и обжига. Изделия характеризуют сложные формы, в большинстве своем требующие специальных способов формования — пленочного и горячего литья из термопластичных шликеров, шликерного литья, изостатического пресования и пр. Для обжига используются высокие температуры — в основном более 1600°С и в ряде случаев специальные печи (с защитной средой, вакуумом, компрессионные и пр.). Используемое на таких предприятиях оборудование определяется спецификой выпускаемой продукции, чаще всего нетипично для других производств керамических изделий и весьма разнообразно. Основная технологическая схема производства керамики, включающая подготовку формовочной массы, формование и обжиг, в производствах технической керамики усложняется и часто включает в себя синтез компонентов сырья, послеобжиговую обработку (металлизацию, пайку, механическую обработку и пр.).

СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ

Оценка экологических угроз

При наличии общей, практически универсальной схемы производства керамических изделий (рис. 10.18), включающей в себя в качестве обязательных стадии подготовки формовочной массы, состоящей из смеси порошков с различным содержанием связки, формования и обжига, производства различных видов керамической продукции, заметно отличается и по количеству технологических стадий, и по параметрам технологии.

Рассмотрим ранее описанные технологии с позиций их ресурсо-, энерго- и трудоемкости, а также экологичности (экологических угроз).

Наиболее масштабное производство керамических изделий — производство керамического кирпича — связано с открытым способом добычи сырья — глин, суглинков, кварцевого песка, что выводит из оборота значительное количество земель. Как правило, сырье из карьера, расположенного на расстоянии до 20 км, поступает на производство автомобильным транспортом, что вносит вклад в загрязнение воздуха. Степень переработки сырья на производстве невелика, безвозвратные потери обычно не превышают 20%, включая потери, связанные с удалением кристаллизационной воды глинистых минералов. В производстве используется сухой способ подготовки массы, при котором потребление воды минимально.

Невысокие температуры обжига (950–1050°С) и высокая плотность садки изделий в печи определяют относительно небольшие удельные энергозатраты (табл. 10.3), однако в себестоимости кирпича они занимают существенное место (по разным оценкам от 20 до 40%).

Основные экологические угрозы данного производства: выделение пыли на операциях измельчения сырья, выделение в процессе обжига сернистых газов, образуемых при разложении соединений серы в глинах.

Производство керамической плитки привязано к районам потребления и основано на использовании в основном привозного сырья, доставляемого, как правило, железнодорожным транспортом. Степень переработки сырья выше, оно подвергается тонкому мокрому помолу и неоднократной сепарации. Помимо собственно сырья для керамики в производстве используют фритты и пигменты для получения глазури. Мокрый способ подготовки сырья обуславливает значительный расход воды. Существенные энергозатраты при распылительной сушке, сушке и обжиге полуфабрикатов в значительной степени компенсируются высокой скоростью этих производственных процессов. Так, скоростной обжиг проходит в роликовых конвейерных печах без использования огнеприпаса (вагонеток, огнеупорных подставок и пр.).

Большую долю (30–50%) в себестоимости керамической плитки занимают сырье и вспомогательные материалы (дорогостоящие фритты, пигменты и пр.). На затраты энергии приходится 20–25% от себестоимости продукции.

Основные экологические угрозы данного производства: выделение пыли при первичном измельчении сырья и распылительной сушке, образование загрязненных водных стоков, выделение сернистых газов при обжиге.

Производство санитарно-технических изделий использует привозное сырье и отличается высокой степенью его переработки. Мокрый способ подготовки сырья, значительные температуры (1220–1250°С) и длительность обжига (более 16 часов) приводят к существенным удельным энергозатратам, в 2–3 раза превышающим затраты производства кирпича и плитки. Массивность изделий заставляет обращать особое внимание на дефектность готовой продукции и использовать способы маскировки поверхностных дефектов (дефектов глазурного покрытия), требующие дополнительного обжига.

В общей себестоимости продукции затраты на сырье и вспомогательные материалы могут достигать 50%, энергозатраты составляют до 20%.

Основные экологические угрозы данного производства: выделение пыли при первичном измельчении сырья и распылительной сушке, образование загрязненных водных стоков, выделение сернистых газов при обжиге.

Производство посуды использует привозное сырье, подлежащее тщательной переработке мокрым способом. Многократные (2–3) обжиги при высоких температурах, обычно 1250–1400°С, низкая плотность садки тонкостенных изделий сложной формы в печах обуславливают значительные удельные энергозатраты. Используются дорогостоящее многокомпонентное сырье и вспомогательные материалы (глазури, декорирующие препараты и пр.).

Основные экологические угрозы данного производства: образование загрязненных водных стоков, выделение загрязненных оксидами газов при обжиге.

Производство огнеупоров связано с применением высоких температур — выше 1450°С, для некоторых видов (периклазовые) — выше 2800°С. В технологии используются многочисленные операции измельчения и рассева для создания определенного зернового состава порошкообразного сырья, что приводит к образованию пыли и сопровождается шумом.

Несмотря на то что значительную часть огнеупорной продукции формуют способом полусухого прессования, используют и иные способы, для которых в состав вводят значительное количество связки. Изделия сложных форм нередко формуют способом шликерного литья.

Основные экологические угрозы данного производства: выделение пыли при измельчении сырья, образование загрязненных водных стоков, выделение сернистых газов при обжиге.

Производство технической керамики характеризуется использованием широкого класса химических соединений — солей, оксидов, кислот, растворителей, полимерных связок и т. д., которые могут представлять опасность для здоровья окружающих. Высокая дисперсность используемых сырьевых материалов предусматривает наличие на производствах эффективных систем пылевыделения. Для производства характерны высокие температуры обжига и, соответственно, большое потребление энергии.

Основными экологическими угрозами ряда производств технической керамики являются химическая агрессивность используемых соединений, образование ультрадисперсной пыли и необходимость очистки водных стоков при применении мокрых способов подготовки сырья и обработки полуфабриката.

Сравнение применяемых технологий в производстве керамических материалов

Сравнение технологий производства керамических изделий по таким показателям, как ресурсоемкость, энергоемкость, экологичность, трудоемкость (таблица 10.3), может говорить лишь о проблемах, характерных для той или иной подотрасли. Так, существенной проблемой в технологии производства кирпича является высокая доля энергозатрат в общей себестоимости продукции, хотя сами по себе удельные энергозатраты уступают энергозатратам в других подотраслях. С другой стороны, большое количество предприятий по производству кирпича означает то, что эта подотрасль вносит основной вклад (более 50%) в энергопотребление всей отрасли производства керамических изделий, что нельзя не учитывать в масштабах экономики страны. С учетом масштаба этой подотрасли необходимо отметить большое потребление природного сырья — глин и суглинков, что еще более остро ставит вопрос о необходимости внедрения технологий, использующих техногенные отходы.

В таких подотраслях, как производство керамической плитки, санитарно-керамических изделий и особенно огнеупоров, большую долю в себестоимости занимают дорогостоящее сырье и вспомогательные материалы. Техническая керамика использует в основном искусственное сырье, которое в целом ряде случаев имеет очень высокую стоимость.

Основная экологическая нагрузка в отрасли связана с выделением пыли и выбросами печных газов, в которых наблюдается существенная концентрация оксидов углерода, серы и азота. Наибольшие выбросы пыли наблюдаются при производстве керамической плитки, что связано с использованием мокрого способа подготовки сырья с применением распылительной сушки. Относительно высокие выбросы вредных газов сопровождают производства кирпича, плитки и, особенно, огнеупоров. Все перечисленные экологические проблемы нивелируются применением современных методов пылеочистки и очистки газов. С другой стороны, устаревшее оборудование и неэффективный менеджмент приводит к загрязнениям на многих небольших предприятиях по производству кирпича.

Кроме перечисленных экологических угроз в производстве керамики существуют проблемы, связанные с использованием в технологическом процессе воды, требующей очистки для возвращения в процесс, а также образование не утилизируемых твердых отходов (бой бракованных изделий, вышедшие из употребления гипсовые формы, упаковка и пр.).

Отдельное внимание необходимо уделять шуму, сопровождающему работу оборудования для транспортировки (конвейерные и прочие транспортеры), измельчения (дробилки и мельницы), сепарации, сушки и обжига (вентиляторы), послеобжиговой обработки (шлифовальные и пр. станки) и пр. Факторы воздействия на окружающую среду, возникающие при производстве керамики, отражены в табл. 10.2.

В табл. 10.3 представлено сравнение подотраслей производства керамических изделий с точки зрения энерго-, ресурсо-, трудоемкости и экологических угроз. Такие отрасли, как производство огнеупоров, технической керамики, посуды, имеют большой потенциал в разработках энерго- и ресурсоэффективных технологий. Производства строительных материалов, прежде всего кирпича и плитки, а также огнеупоров требуют современного экологического сопровождения технологий.

Таблица 10.2. Факторы воздействия производства керамических изделий на окружающую среду (по ИТС 4–2015 «Производство керамических материалов» с изменениями и дополнениями)

Стадии технологического процесса	Воздействие на компоненты ОС			Шум (работа оборудования)
	воздуха (образование выбросов ЗВ при технологических операциях в процессе)	воды (использование в процессе и образование сточных вод)	почвы (образование отходов производства и технологических потерь, преимущественно в виде пыли)	
Дробление	×	–	×	×
Сухой помол и смешение	×	–	×	×
Мокрый помол и смешение	–	×	–	×
Рассев / классификация	×	–	×	×
Перемещение сырья	×	–	×	–
Хранение в силосах	×	–	–	–
Литьевой шликер	–	×	–	–
Массоподготовка				
Масса для пластического формования	–	×	×	–
Жесткая формовочная масса (формование обточкой)	–	×	×	–
Пресс-порошок, подготовка сухим способом	×	×	×	×
Пресс-порошок, распылительная сушка	×	×	×	×
Грануляция	×	–	–	×
Шликерное литье	–	×	–	–
Пластическое формование	–	×	×	–
Формование обточкой	–	–	×	–
Прессование	×	–	×	×
Оправка	×	×	×	–
Сушка	×	–	–	×
Глазурование	×	×	×	–
Ангобирование	×	×	×	–
Нанесение декора	×	×	×	–
Обжиг	×	–	–	×
Послеобжиговая обработка	×	×	×	×
Хранение материалов	×	–	–	–

Примечания:

× — значимое воздействие на ОС.

– — незначимое воздействие или практическое отсутствие такового.

Таблица 10.3. Сравнение подотраслей производства керамических изделий / материалов

Подотрасль	Энергоемкость		Ресурсоемкость			Экологичность		Трудоемкость	
	уд. затраты*	доля в себестоимости, %	кол-во компонентов	дороговизна компонентов	доля в себестоимости, %	выбросы пыли**	выбросы оксидов в печных газах***	количество стадий	степень автоматизации
Кирпич	низкие ++	до 50	мало ++	низкая ++	до 20	средне –	много –	немного +	средняя +
Плитка	средние +	до 25	много –	средняя +	30–50	много --	много –	много –	высокая ++
Сантехника	высокие –	до 20	немного +	средняя +	до 50	средне –	мало +	немного +	средняя +
Посуда	очень высокие --	до 30	много –	высокая --	до 30	мало +	мало +	много –	малая –
Огнеупоры	высокие –	10	немного +	высокая --	до 70	средне –	очень много --	немного +	средняя +
Техническая керамика	очень высокие --	–	немного +	очень высокая ---	–	средне –	мало +	много –	высокая ++

Примечания:

* низкие — 1000–3000, средние — 2200–3900, высокие — 4000–11 000, очень высокие — 12 000–25 000 КДж/кг;

** мало — 1–5, средне — 5–80, много — 100–1500 Мг/кг продукта;

*** мало — до 120, много — 120–300, до 480 г/т продукта.

Для производства того или иного массового керамического продукта за редким исключением используют технологии, разработанные в последние 50 лет, т. е. в целом технологию керамики можно назвать довольно консервативной. Однако вызовы времени, и прежде всего в области энергетической и экологической эффективности, заставляют более интенсивно работать над снижением энергозатрат в обжиге керамической продукции и повышать функциональность изделий.

Примером решений в области повышения энергоэффективности в областях производства и эксплуатации строительной керамики является переход от выпуска рядового строительного кирпича с пустотностью 30%, столь распространенного еще во второй половине XX в., к выпуску многослойных поризованных блоков и, в последнее время, керамических блоков с минеральной теплоизоляцией. Этот переход осуществлялся в связи с резким повышением требований к эффективности теплоизоляции кирпичных стен (табл. 10.4, рис. 10.20).

Таблица 10.4. Зависимость теплопроводности от формата кирпича

Свойства кирпича	Пустотелый кирпич	Блок (камень) поризованный	Блок (камень) с минеральной теплоизоляцией
Формат	1	12,35	10,7
Теплопроводность, Вт/мК	0,22	0,18	0,07

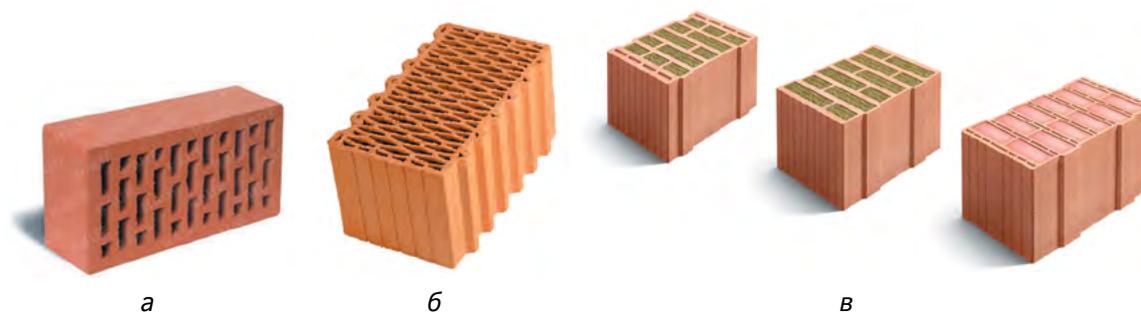


Рис. 10.20. Разные поколения теплоизоляционной керамики:
 а) пустотелый кирпич; б) поризованный блок;
 в) блоки, наполненные минеральной теплоизоляцией

Переход к выпуску крупноформатной поризованной керамики с использованием в качестве порообразующей выгорающей добавки отходов деревообработки привел к снижению количества использованного глинистого сырья и топлива для обжига. Затраты на энергию, требуемую для обжига, по сравнению с обычным кирпичом снижаются с более чем 2,5 ГДж/т до 1–2 ГДж/т.

Однако выбросы газообразных веществ при использовании газообразователей возрастают, что требует как коррекции исходного состава глинистого сырья с целью связывания образующих кислых газообразных оксидов (введение кальцийсодержащего сырья), так и использования методов очистки отходящих газов «на конце трубы».

Одна из наиболее динамично развивающихся технологий — технология керамической плитки — претерпела в последней четверти XX в. существенные изменения: в течение 10–15 лет была повсеместно внедрена технология скоростного обжига плитки в роликовых печах, разработанная советскими инженерами. Стадии прессования полуфабриката, его транспортировки, сушки, обжига и (для глазурованных плиток) глазурования и декорирования, сортировки и упаковки были объединены в составе автоматизированных поточных линий.

Технология отвечала самым передовым требованиям энергосбережения, остающимся актуальными до сих пор, и обладала следующими преимуществами:

- существенное сокращение цикла обжига с 20–30 часов до менее чем 1 часа;
- ликвидация огнеприпаса (вагонеток, огнеупорных стоек и плит), используемого для обжига;
- сокращение энергозатрат на сушку и обжиг (для пористых плиток и керамогранита соответственно) с 3500–3900 кДж/кг до менее чем 2900 кДж/кг;
- сокращение объема отходящих (дымовых) газов — с 15 000 м³/ч до 10 000–13 000 м³/ч;
- полная автоматизация основного производственного процесса.

Следующим существенным этапом совершенствования современной технологии керамической плитки должен быть ее переход на сухой способ подготовки массы вместо используемого сейчас мокрого (шликерного) способа. Известно, что энергозатраты на распылительную сушку составляют 35–40% от общих затрат энергии. Кроме того, сушка в башенных распылительных сушилках сопровождается значительными выбросами оксидов углерода.

Сравнение двух способов подготовки и примерных энергозатрат, используемых при их реализации, приведено в табл. 10.5.

Данные, представленные на рис. 10.21, убедительно показывают перспективность использования сухого способа подготовки пресс-порошка, однако сейчас широко применяется мокрый способ, обеспечивающий высокую однородность продукта.

Таблица 10.5. Сравнение основных стадий технологии производства керамики

Стадия технологии	Используемое оборудование	Использование воды, м ³ /т	Затраты энергии (электроэнергия), кВт·ч/т	Затраты энергии (топливо), кВт·ч/т	Выбросы пыли, г/кг	Выбросы CO, кг/т
Мокрый способ подготовки пресс-порошка						
Мокрый помол	Шаровые мельницы	0,45–0,50	38–40	–	10–20*	–
Распылительная сушка	Башенная распылительная сушилка			500–550	5–10*	85–90
Сухой способ подготовки пресс-порошка						
Сухой помол	Маятниковые или молотковые мельницы	0,12–0,16	32–38	111–117	40–60*	29–35
Гранулирование	Грануляторы с увлажнением					
Сокращение затрат, %		+70	+10	+80	–50	+60

* Указаны неорганизованные выбросы пыли, намного превышающие организованные.

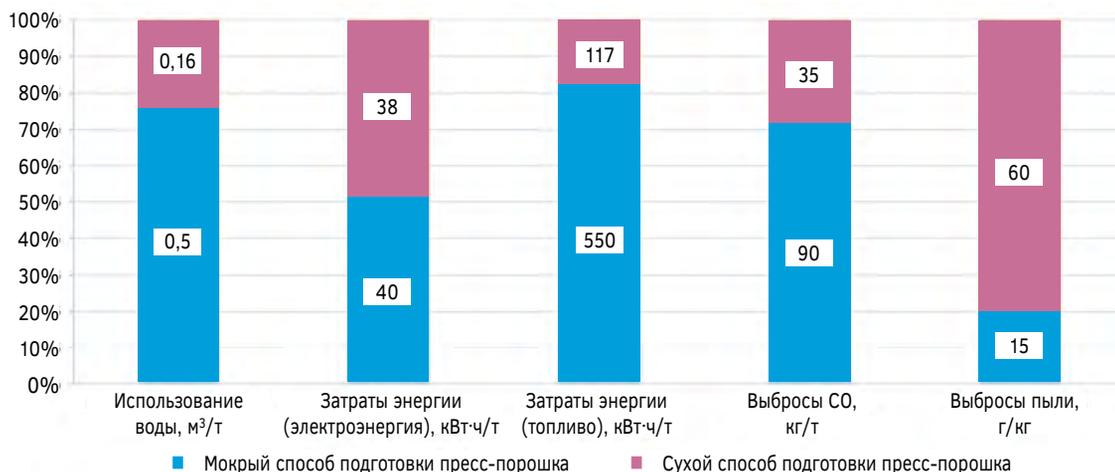


Рис. 10.21. Сравнение технологий приготовления пресс-порошка для формования керамической плитки сухим и мокрым способами

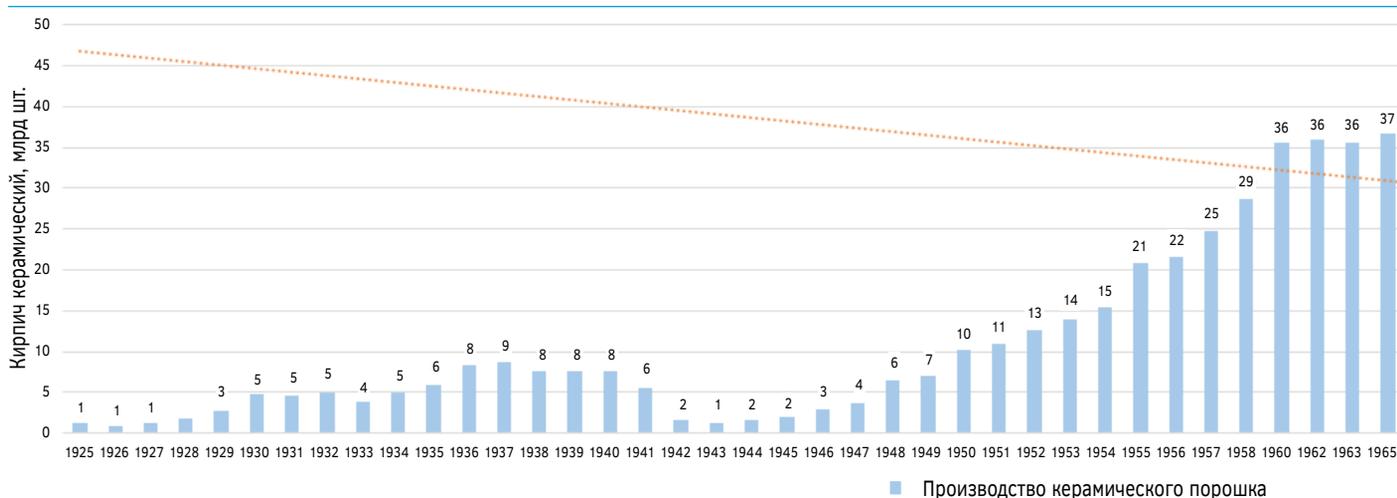


Рис. 10.22. Динамика производства керамического

РОЛЬ ПРОИЗВОДСТВА КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ЭКОНОМИКЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ И МИРА

Производство керамических изделий занимает самостоятельное и стабильное место, прежде всего, в строительном секторе экономики. Это производство мелкоштучных керамических материалов (керамический кирпич и плитка).

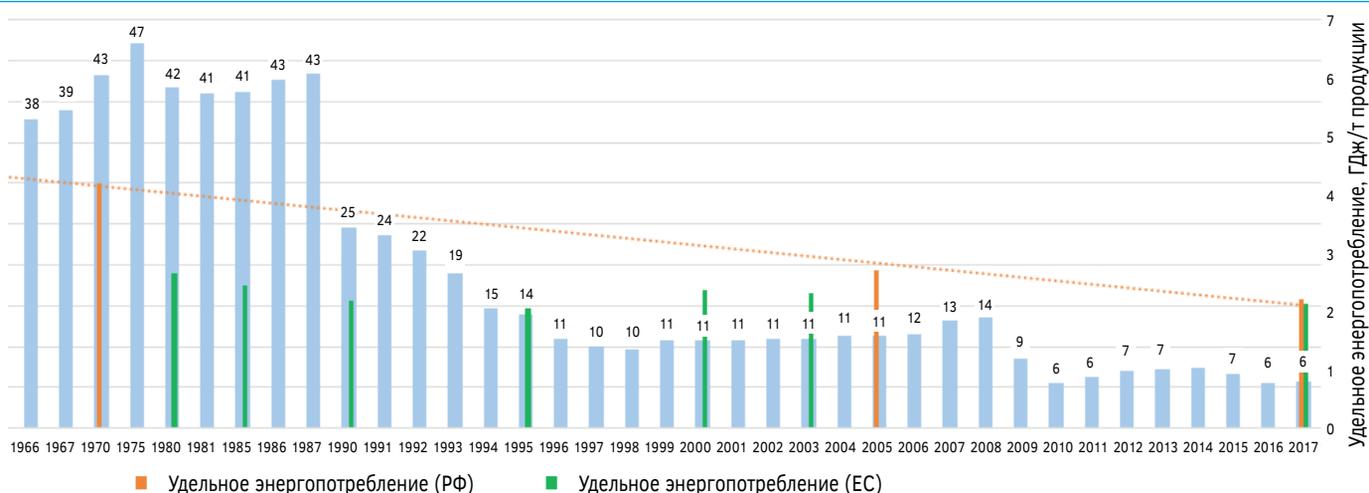
Примером зависимости развития строительной отрасли и производства строительных материалов от политико-экономических проблем, переживаемых страной, служит динамика выпуска строительного керамического кирпича в СССР и Российской Федерации за последние сто лет (рис. 10.22). Спады в его производстве были связаны с Гражданской и Великой отечественной войнами, рост — с возрождением промышленности. Производство достигло своего максимума в 70–80-е гг. XX в. и после ликвидации СССР вплоть до конца 90-х испытывало стремительное падение.

Производство кирпича в течение последних 10 лет стабилизировалось на уровне 6–7 млрд шт. условного кирпича в год, тогда как производство керамической плитки, несмотря на существенные временные спады (например, в течение последних двух лет), десятилетиями имеет тенденцию к росту (в России от менее 100 млн м² в год в 2000–2005 гг. до около 170 млн м² в последние пять лет) (рис. 10.23).

В производстве хозяйственно-бытовой керамики, представленном посудой и санитарно-техническими изделиями, имеются разные тенденции — если производство посуды по-прежнему находится в стадии стагнации, то производство керамической сантехники, подобно производству плитки, в последние 15 лет показывает небольшой, но устойчивый рост (от менее 10 до 13 млн шт. в год) с закономерными спадами в кризисные годы. Производство керамики в мире растет в основном за счет азиатского региона, в котором ведущую роль играет КНР, занимающая первое место в мире по выпуску всех видов керамических материалов, тогда как в Западной Европе, пусть и замедленными темпами, продолжается сокращение производства и перенос его на Восток.

Производство огнеупоров сильно зависит от тенденций развития черной металлургии. В этой подотрасли происходят, скорее, качественные изменения, связанные с перевооружением в целях дальнейшего сокращения потребления огнеупоров на тонну металла. Так, за последние 50 лет потребление огнеупоров на 1 т выплавленной стали сократилось в пять раз.

Производство огнеупоров в Европе, США и Японии сокращается, в КНР, наоборот, наблюдается обратная тенденция. Возрастает зависимость производств от наличия качественного сырья. В России возрастает доля использования отечественных огнеупоров.



кирпича (СССР и Российская Федерация)

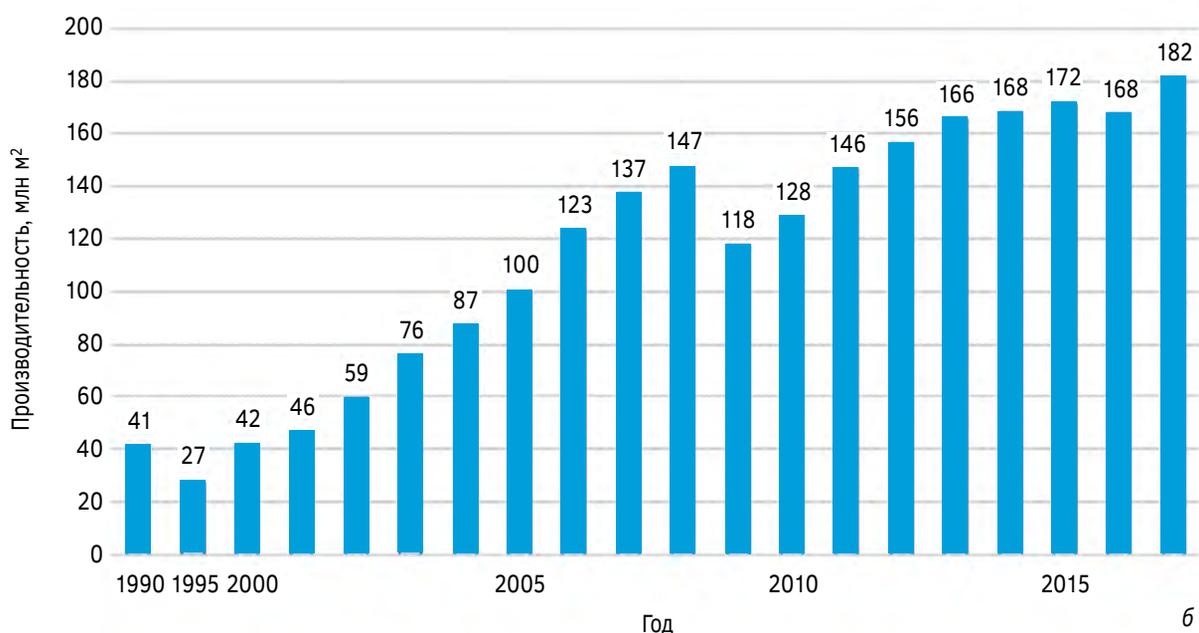
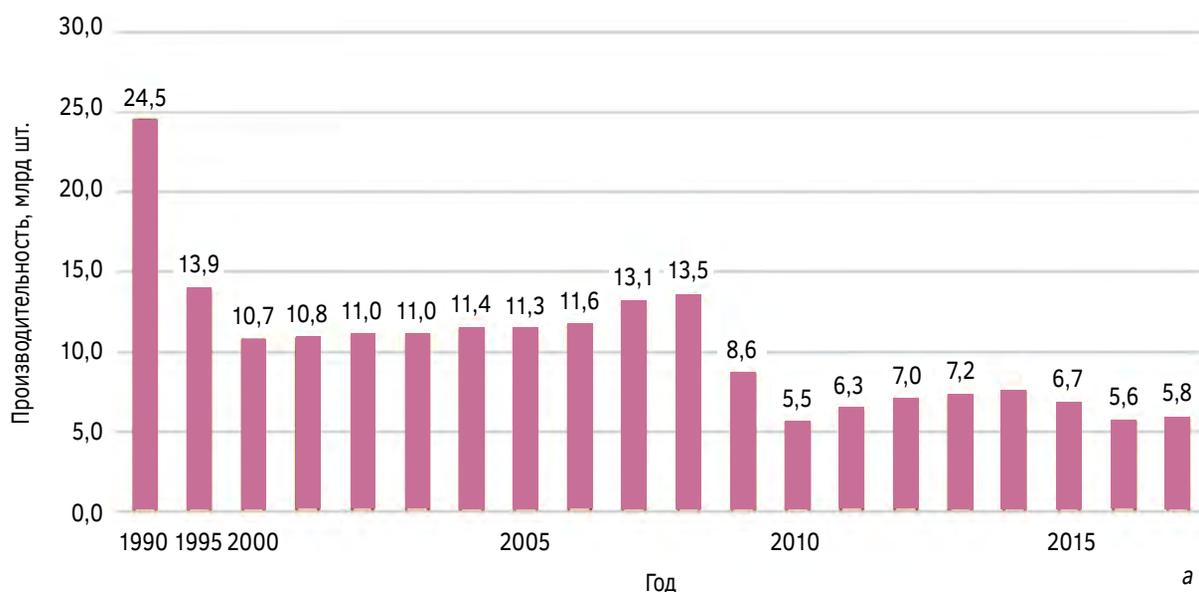


Рис. 10.23. Динамика производства строительных керамических изделий в Российской Федерации: а) керамический кирпич; б) керамическая плитка (источник: РОССТАТ: <http://www.gks.ru/>)

Производство технической керамики связано с такими наукоемкими отраслями, как электроника, машиностроение, оборонная, авиационная и космическая промышленность. Производство керамических и керамоматричных композиционных материалов занимает небольшое место в общем объеме производящихся керамических изделий и сосредоточено на небольшом ряде предприятий, в том числе малых.

В мировой экономике сектор производства керамических изделий в последние 25 лет претерпел изменения: на первое место в стоимостном выражении вышло производство изделий технической керамики, на второе — керамической плитки, производство кирпича и черепицы переместилось на третье место.

Наибольший рост по различным оценкам в стоимостном выражении наблюдается в области выпуска технической керамики различного назначения, однако оценить ее рынок

не представляется возможным, прежде всего, из-за разнообразия видов и областей назначения выпускаемых материалов.

Из строительных материалов устойчивый рост с падением его темпа в последние три года показывает керамическая плитка.

В табл. 10.6 показаны оценки уровня производства керамики различных видов в мире и Российской Федерации. Приблизительность оценок объясняется отсутствием доступных объективных статистических данных.

Таблица 10.6. Место Российской Федерации в мировом производстве основных видов керамики

Подотрасль производства керамики	Мировое производство, млн шт.	Производство в РФ, млн шт.	Доля РФ, %
Кирпич	1 465 000 (2017)	5800 (2017)	0,4
Плитка	12 359 (2016)	168 (2016)	1
Сантехника	349,3 (2014)	14,3 (2017)	4
Посуда	12 000 (2017)	18,4 млн шт. (2015)	0,1
Огнеупоры	46 300* (2016)	2566* (2015)	6**
Техническая керамика	данных нет	данных нет	—

* В тыс. т.

** По другим оценкам, доля РФ в мировом производстве огнеупоров составляет 3%.

Как следует из приведенных данных, экономика Российской Федерации не играет существенной роли в мировом производстве керамики. Потребности отечественного рынка во многих областях, за исключением кирпича и, в последнее время, огнеупоров, во многом удовлетворяются за счет импорта. К тому же на российском рынке присутствуют крупные иностранные производители керамической плитки, сантехники, кирпича.

В целом промышленность, связанная с производством керамических изделий, характеризуется как энерго- и ресурсозатратная без значительного потенциала расширения, но с перспективой качественных изменений с целью увеличения доли современных материалов с высоким уровнем свойств и повышения экономической эффективности и решения экологических проблем.

Отрасль в целом имеет существенные резервы развития за счет увеличения объемов строительства и значительного роста цен на импортную продукцию. С другой стороны, возрастание конкуренции ставит отечественные предприятия перед необходимостью постоянно модернизировать технологию с целью повышения качества продукции и соответствия ее всем, в том числе экологическим, международным требованиям.

ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ

Ускорение научно-технического прогресса, связанное с бурным развитием информационных технологий, и острая необходимость перехода к новому технологическому укладу, основанному на энергоэффективности, ставят перед производствами керамических изделий ряд важных задач.

Общие тенденции в развитии технологии керамики следующие:

- снижение энергозатрат при обжиге за счет сокращения цикла обжига и снижение температуры за счет модификации составов, совершенствования техники обжига (прежде всего для строительной, хозяйственно-бытовой керамики), применения новых физических принципов спекания (для технической керамики);
- снижение количества использованного сырья за счет модификации формы изделия (уменьшения массы и совершенствования конструкции) и использования композиционных материалов;
- повышение функциональности керамических материалов за счет совершенствования их состава и структуры (использование наноматериалов, создание керамоматричных композитов и пр.), а также оптимизации формы изделий.

Основными тенденциями в технологиях

- **кирпича** является разработка высококачественных керамических материалов за счет тщательной переработки компонентов сырья, энергосбережение за счет использования в качестве значительных компонентов сырья техногенных отходов, интенсификации сушки и обжига, оптимизации конструкции и уменьшения массы изделий (сокращение выпуска полнотелого кирпича), роботизация производства;
- **керамических плиток** — увеличение их форматов, расширение возможностей декора, наносимого способом цифровой печати, снижение энергопотребления и уровня выбросов за счет однократного обжига, избавления от дополнительного декоративного обжига и перехода на сухой способ подготовки массы;
- **посуды** — компьютерное моделирование форм, изготовление литейных форм и капов с помощью фрезеровальных центров с ЧПУ, использование скоростного обжига, применение менее вредных компонентов для декорирования изделий, использование технологии литья под давлением в пластиковые формы и изостатического прессования;
- **керамических санитарно-технических изделий** — компьютерное моделирование форм, увеличение доли изделий, производящихся с помощью литья под давлением в пластиковые формы, сокращение цикла обжига, роботизация тяжелых и вредных операций (транспортировка, оправка, глазурирование);
- **огнеупоров** — увеличение доли безобжиговых огнеупоров, в том числе огнеупорных бетонов, компьютерное моделирование дизайна огнеупорной кладки и агрегатов в целом с целью продления срока их службы, использование глубокой переработки низкокачественного сырья с целью достижения приемлемого качества продукции, увеличение доли утилизации огнеупоров, отслуживших срок, снижение энергозатрат путем разработки прогрессивных способов производства. В целом возрастают требования к качеству огнеупорной продукции;
- **технической керамики** — использование новых классов сырьевых материалов (в частности, нанопорошков), применение компьютерных программ инженерного анализа для повышения функциональности изделий, использование аддитивных технологий. Из-за высокой энергоемкости производства постоянное внимание должно уделяться снижению температур обжига изделий и оптимизации его режима.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. 2016. Мировое производство керамической плитки // ИНФОкерамика. Информация о керамике [сайт]. — URL: <http://info-ceramica.ru/article/2016-mirovloe-proizvodstvo-keramicheskoy-plitki> (дата обращения: 15.04.2019). — Загл. с экрана.
2. Аналитический отчет. Российский рынок санитарной керамики (санфаянса) : демоверсия [электронный ресурс] / Abarus Market Research. — 2017. — URL: <http://www.abarus.ru/cnt/complete/santechnika/santech/103/demo> (дата обращения: 15.04.2019).
3. Андрианов, Н. Т. Химическая технология керамики : учеб. пособие для вузов / Н. Т. Андрианов, В. Л. Балкевич, А. В. Беляков [и др.] ; под ред. И. Я. Гузмана. — М. : ООО РИФ «Стройматериалы», 2012. — 496 с.
4. Жиронкин, П. В. История и перспективы промышленности керамических строительных материалов в России / П. В. Жиронкин, В. Н. Герашенко, Г. И. Гринфельд // Строительные материалы. — 2012. — Май. — С. 13–18.
5. Инновации больших плит начинаются с «малых форматов». Andrea Gozzi. Sistem Lamina (Fiorano, Italy) // Ceramic Word Review Batimat Russia 2017. — С. 24–28. — URL: <https://www.ceramicworldweb.it/filealbum/Home/cww/pdf/cwr/2017/cwr-russia-2017.pdf> (дата обращения: 30.10.2019).
6. История возникновения кирпича // Архитектура в России [сайт]. — 2012. — URL: <http://archirussia.com/istoriya-2/istoriya-vozniknoveniya-kirpicha/> (дата обращения: 15.04.2019). — Загл. с экрана.
7. ИТС 4–2015. Производство керамических изделий. — М. : Бюро НДТ, 2015. — 222 с.
8. Когда изобрели кирпич — история возникновения // Стройкирпич.ком : справочник домашнего строителя [сайт]. — [2014]. — URL: <http://stroykirpich.com/kogda-izobrel-i-kirpich-istoriya-vozniknoveniya.html> (дата обращения: 15.04.2019). — Загл. с экрана.
9. Колина, Е. Мировой рынок строительного керамического кирпича остается стабильным / Е. Колина // INDEX BOX. Marketing & consulting [официальный сайт]. — 2018. — URL: <http://www.indexbox.ru/news/mirovoj-rynok-stroitel'nogo-keramicheskogo-kirpicha-ostayotsya-stabilnym/> (дата обращения: 15.04.2019). — Загл. с экрана.
10. Колина, Е. Российский рынок санитарной керамики постепенно стабилизируется / Е. Колина // INDEX BOX. Marketing & consulting [официальный сайт]. — 2018. — URL: <http://www.indexbox.ru/news/rossijskij-rynok-sanitarnoj-keramiki-postepenno-stabiliziruetsya/> (дата обращения: 15.04.2019). — Загл. с экрана.
11. Коротков, А. Н. Эволюция огнеупорного рынка / А. Н. Коротков // Промышленные страницы Сибири. — 2017. — № 10 (123). — С. 10–14.
12. Правительство Российской Федерации. Распоряжение от 10 мая 2016 г. № 868-р. Стратегия развития промышленности строительных материалов на период до 2020 года и дальнейшую перспективу до 2030 года. — URL: <http://static.government.ru/media/files/RnBfAw072e3tmmykU2lrh1LI1HaHeG0q.pdf> (дата обращения: 22.10.2019).
13. Производство фарфоровой посуды в России // ConCentre [сайт]. — 2013. — URL: <http://concentre.ru/farforovye-predpriyatiya/proizvodstvo-farforovoj-posudy-v-rossii.html> (дата обращения: 15.04.2019). — Загл. с экрана.
14. Процессы керамического производства / пер. с англ. А. М. Черепанова ; под ред. П. П. Будникова. — М. : Изд-во иностранной литературы, 1960. — 280 с.
15. Российский рынок огнеупоров // Группа компаний Вира. — 2016. — URL: <https://www.vira.ru/exp/news/detail.php?ID=46292> (дата обращения: 15.04.2019). — Загл. с экрана.
16. Сентенс, Б. Керамика. Путеводитель по традиционным техникам мира / Б. Сентенс. — М. : АСТ-Астрель, 2005. — 216 с.
17. Смирнов, А. Н. Основные тенденции развития рынка огнеупорных материалов и изделий в условиях трансформации требований металлургов к огнеупорной продукции. Современные огнеупоры: ресурсосбережение и применение в металлургических технологиях : сб. научн. тр. / А. Н. Смирнов ; под ред. А. Н. Смирнова. — Донецк : ДонНТУ, 2013. — 200 с. — URL: <https://steeltimes.ru/conferences/conferences/2013/refractories/1/1.php> (дата обращения: 15.04.2019).
18. Томаев, Г. Н. Резная майоликовая мозаика в архитектуре Средней Азии. — М. : Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1951. — 120 с.
19. Янукович, Ф. Рынок огнеупоров в России: металлурги переориентируются на отечественные огнеупоры / Ф. Янукович // INDEX BOX. Marketing & consulting [официальный сайт]. — 2016. — URL: <http://www.indexbox.ru/news/rossiyskie-metallurgi-pereorientiruyutsya-na-otchestvennyye-ogneupory/> (дата обращения: 15.04.2019). — Загл. с экрана.
20. Ceramic Industry Roadmap: Paving the way to 2050 // Cerame-Unie. The European Ceramic Industry Association [website]. — 2012. — URL: <http://cerameunie.eu/topics/cerameunie-sectors/cerameunie/ceramic-industry-roadmap-paving-the-way-to-2050/> (accessed: 15.04.2019). — Screen heading.

21. Growth in the Refractories Industry. Multiple factors are expected to boost demand in the refractories market // Ceramic Industry [website]. — 2017. — URL: <https://www.ceramicindustry.com/articles/96135-growth-in-the-refractories-industry> (accessed: 15.04.2019).
22. *Kingery, W. D.* Ceramic Masterpieces. Art, Structure and Technology / W. D. Kingery, P. B. Vandiver. — New York ; London : Free Press, 1986. — 339 p.
23. Reference Document on Best Available Techniques in Ceramic Manufacturing Industry. — The European IPPC Bureau, 2007.
24. *Reh, H.* The Ranking of the European Ceramic Industry in the Ever Increasing Globalisation Process // Hubertus Reh. Ceramic forum international Yearbook 2005. — Ed. by H. Reh. — Baden-Baden : Göller Verlag, 2005. — 174 p. — P. 11–24.
25. The Potter's Dictionary of materials and techniques. — 5 th edition / F. and J. Hamer. — London : A&C Black ; Philadelphia (PA) : University of Pennsylvania Press, 2004. — 437 p.
26. The real ECO-friendly ceramic tiles body preparation // Manfredoni & Schianchi [official website]. — URL: <http://www.manfredinieschianchi.com/216-2EN-fusion-ceramic-tile-body-preparation-dry-milling.htm> (accessed: 15.04.2019). — Screen heading.
27. World Refractories // Freedonia. reliable and unbiased industry market research [website]. — URL: <https://www.freedoniagroup.com/industry-study/world-refractories-2985.htm> (accessed: 15.04.2019). — Screen heading.
28. World sanitaryware production and exports / MECS, Acimac Research Department // The International. — 2017. — Vol. 1. — P. 70–75. — URL: https://www.ceramicworldweb.it/filealbum/Home/materialicasa/pdf/tile-international/2017/1/070_075%20Statistic%20SANITARI.pdf (accessed: 15.04.2019).
29. World sanitaryware production and exports // Ceramic World Review. — 2015. — Vol. 114. — P. 56–65. — URL: <https://www.ceramicworldweb.it/cww-en/statistics-and-markets/world-sanitaryware-production-and-exports/> (accessed: 15.04.2019).

ПРОИЗВОДСТВО СТЕКЛА

Елена Евгеньевна Строганова

РХТУ им. Д. И. Менделеева, кандидат технических наук

Кирилл Александрович Щелчков

Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики»,
зам. начальника отдела стандартизации, методологии и оценки НДТ

ВВЕДЕНИЕ

Оно бывает жидким и твердым, прозрачным и абсолютно черным, гладким и шероховатым. О его изобретении складывают легенды, ибо никто точно не знает, кто первый его придумал, а за разглашение секретов изготовления в Средние века преследовали и убивали. Оно есть и в храме, и в кабаке, под водой и в космическом пространстве, в каждой прихожей и кухне.

Думаю, что вы уже догадались, что речь идет о стекле — удивительном материале, который известен более четырех тысячелетий, но до сих пор хранит тайну своего строения.

Оглянитесь вокруг и сосчитайте, сколько изделий из стекла окружают нас в повседневной жизни.

А началась его история в Древнем Египте, когда мастера-горшечники покрывали голубовато-зеленоватой стеклянной глазурью плитки для украшения стен храма. Глазурь варили из песка с добавками бирюзовой или малахитовой крошки. Оно тогда совсем не было похоже на то, что теперь называют стеклом. Его главное достоинство — прозрачность — никому не было известно.

Так бы до сих пор и покрывали глазурью плитки, если бы однажды мастер не заметил, что после обжига плиток в костре остались круглые голубовато-зеленоватые шарики, напоминающие бирюзу и малахит. Это лишняя глазурь «сползла» с плитки и капнула в огонь, а потом застыла в виде шарика, похожего на драгоценный камень. Цветные камни, из которых делали женские украшения, ценились всегда, и первые цветные стекла старались сделать похожими на натуральные камни — сапфиры, гранаты, малахиты, сердолики и многие другие, в зависимости от того, в чем была потребность. Вот тогда-то и задумались о прозрачности — как иначе сделать сапфир или гранат?

Дальше — больше. Бусы делали с помощью керамического сердечника, чтобы сразу получалась дырочка для нанизывания. А раз можно сделать бусину с отверстием, почему бы не сделать тем же методом сосуд для благовоний? Совсем маленький, высотой не больше 5–7 сантиметров. Первые образцы стеклянной тары, датированные II тысячелетием до н. э., поражают яркостью цветов и разнообразием приемов декорирования, которые придумывали первые мастера, чтобы каждый сосуд был лучше другого, но вмещают в себя не более 100 мл жидкости!

Между тем мастерство стеклоделов совершенствовалось. Они научились получать стекло нужного цвета и доваривать его в плоских чашах, чтобы освободиться от пузырей. Вязко-текучую массу выливали в форму и прессовали, чтобы получить тарелку или блюдо, или наматывали на песчаные сердечники, чтобы получить полые изделия. Фигурки священных животных и египетских богов, глазурованные или прессованные из непрозрачного стекла, сохранились до наших дней. У египтян получались даже бесцветные стекла, но это было, скорее, случайностью, чем желанием получить новый материал.

Древнее египетское царство постигла участь большинства империй — его завоевали римляне и вместе с ним получили все ремесла. Роль римских мастеров в истории стекла трудно переоценить. Им выпала честь придумать предмет, совершивший переворот в технологии стекла, и остаться в истории империей, давшей человеку новый материал, поскольку они изобрели выдувную трубку. К тому времени была отработана технология бесцветного стекла, и вполне естественно, что первые стеклянные рюмки, бокалы и фужеры стали выпускать именно в Римской империи.

Мастерству древних стеклоделов не перестаешь удивляться. Они плавил сырьевые компоненты в глиняных чашах на огне костров, на глаз определяли степень готовности стекла к формованию, не имели ни малейшего представления о согласованности коэффициентов расширения для разных стекол в одном изделии, но создали столько удивительных форм и способов декорирования, что их с лихвой хватило до самой эпохи Возрождения.

СТРУКТУРА СТЕКОЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

Стекольная промышленность является производственной отраслью, то есть отраслью создания материальных благ.

Отрасль включает в себя предприятия по производству собственно стекла, а также предприятия по производству фарфора и фаянса.

В стекольном производстве следует выделить предприятия по производству стекла листового и тарного. Тарная подотрасль объединяет предприятия по выработке (варке) стекла и линии по формированию емкостей из стекла для напитков и пищевой продукции.

Отдельное направление производства — сортовое стекло — производство столовой посуды, высокохудожественных и часто уникальных изделий — сосудов для вина и напитков.

Производство плоского стекла является основным продуктом для конкретных подотраслей, осуществляющих переработку листового стекла.

Листовое стекло перерабатывается для использования в автомобилестроении, в остеклении вагонов рельсового транспорта, в мебельной промышленности, в сельском хозяйстве для остекления оранжерей и, конечно, в строительной отрасли для остекления промышленных зданий и сооружений в жилищном строительстве. Небольшой подотраслью по производству стекла, но отличающейся весьма широким ассортиментом изделий, является подотрасль специального стекла. Предприятия специального стекла производят светотехническое, медицинское, химико-лабораторное, растворимое стекло, стекловолокно и пр.

Основные подотрасли стекольного производства (оцениваемые по их долям в общем объеме производства стекла в России) ранжируются в соответствии с табл. 11.1.

Таблица 11.1. Соотношение производства стекла по подотрасли

Подотрасль	% от общего числа
Тарное стекло	52,8
Листовое стекло	25,2
Сортовое стекло	3,9
Специальное стекло	3,1
Стекловолокно	2,4
Прочие производства	12,6

Производство листового стекла является вторым по величине сектором в стекольной промышленности Российской Федерации, который составляет приблизительно 25% от общего объема производства стекольной продукции. В настоящее время в Российской Федерации производится только один вид листового стекла — флоат-стекло, которое используется для

изготовления изделий строительного, технического и мебельного назначения. В прошлые годы в стране функционировали предприятия, выпускавшие листовое стекло методом вертикального вытягивания, прокатное стекло (в том числе армированное).

В год сектор производит приблизительно 2,7 млн т стекла на 12 флоат-линиях компаний, работающих в Российской Федерации. Изготовление листового стекла в Российской Федерации представлено как ведущими международными (Asahi Glass, NSG, Guardian Industries, Sisecam, Saint-Gobain), так и такими известными российскими компаниями, как АО «Салаватстекло», АО «СаратовСтройСтекло», АО «Каспийский завод листового стекла».

Основные производственные мощности расположены в центральной и южной частях Российской Федерации, а также в Республиках Башкортостан, Дагестан и Татарстан.

Основными сегментами рынка листового стекла в Российской Федерации являются светопрозрачные конструкции и интерьерное стекло (75–85%), остальные 15–25% приходятся на автомобильную промышленность и транспортное машиностроение, а также производство мебели и бытовой техники. Открытие дополнительных современных стекольных заводов позволило практически полностью заместить импорт стекла стекольной продукцией российского производства. Российская стекольная индустрия является одной из самых конкурентоспособных отраслей отечественной экономики: большинство заводов построены в последние 10 лет в соответствии с лучшими мировыми стандартами и выпускают качественную конкурентоспособную продукцию. Подтверждением тому является активное развитие несырьевого экспорта. Помимо таких традиционных рынков сбыта, как страны СНГ, российская стекольная индустрия активно завоевывает новые рынки.

Тарное стекло — одна из наиболее крупных подотраслей стекольной промышленности Российской Федерации, занимающая более 50% рынка выпускаемой отрасли продукции. В среднем в год в стране производится около 7 млн т тарного стекла.

Потребление данной продукции в разных сегментах экономики показано на рис. 11.1.

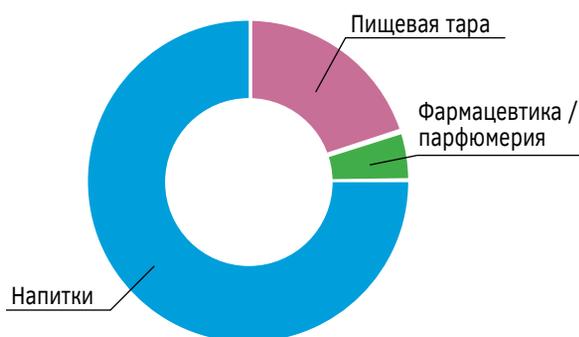


Рис. 11.1. Потребление тарного стекла в разных сегментах экономики

По данным на 2015 г., в Российской Федерации функционировали несколько десятков предприятий по производству стеклотары; характерная мощность производственных линий варьирует от 150 до 300 т стекломассы в сутки. Типичное распределение установок в пределах различных диапазонов производительности отображено в табл. 11.2.

Таблица 11.2. Распределение установок в пределах различных диапазонов производительности

Диапазон мощности производственных линий (т/сут)	< 150	От 150 до 300	От 300 до 600
Количество предприятий в каждом диапазоне	12	63	8
Доля предприятий в каждом диапазоне, %	15	75	10

Из-за транспортных расходов большая часть стеклянной тары продается в пределах 500 км от места производства. В секторе парфюмерно-косметической промышленности ситуация иная, и импорт может составлять более 40% потребления.

Основные предприятия по производству листового и тарного стекла в Российской Федерации представлены в табл. 11.3 и рис. 11.2.

Таблица 11.3. Основные производители листового и тарного стекла в Российской Федерации

№ на карте	Регион	Предприятие
Производство листового стекла		
2	Ставропольский край	АО «ЮгРосПродукт»
3	Республика Дагестан	АО «Каспийский завод листового стекла»
4	Ростовская область	ООО «Гардиан Стекло Ростов»
6	Московская область	ООО «Пилкингтон Гласс»
		ООО «Эй Джи Си Флэт Гласс Клин»
7	Рязанская область	ООО «Гардиан Стекло Рязань»
9	Саратовская область	АО «Саратовский институт стекла»
		АО «СаратовСтройСтекло»
12	Нижегородская область	АО «Эй Джи Си Борский стекольный завод»
14	Республика Татарстан	ЗАО «Тракья Гласс Рус»
15	Республика Башкортостан	АО «Салаватстекло»
Производство тарного стекла		
1	Республика Северная Осетия — Алания	ООО «Луч»
5	Калужская область	ОАО «Березичский стекольный завод»
6	Московская область	ЗАО «Дмитровский стекольный завод»
		ОАО «Клинский стекольный завод»
		ООО «Сергиево-Посадский стеклотарный завод»
		ООО «Солнечногорский стекольный завод»
8	Пензенская область	ЗАО «Никольский завод светотехнического стекла»
10	Владимирская область	ОАО «Гусевский стекольный завод им. Дзержинского»
		ООО «Завод Символ»
		ООО «Красное Эхо»
		ООО «Опытный стекольный завод»
11	Ленинградская область	ОАО «Киришский стекольный завод»
12	Нижегородская область	АО «Балахнинское стекло»
13	Вологодская область	ООО «Чагодощенский стекольный завод»
14	Республика Татарстан	ООО «Васильевский стекольный завод»
16	Удмуртская Республика	ООО «Факел»
17	Омская область	ООО «Омский стекольный завод»

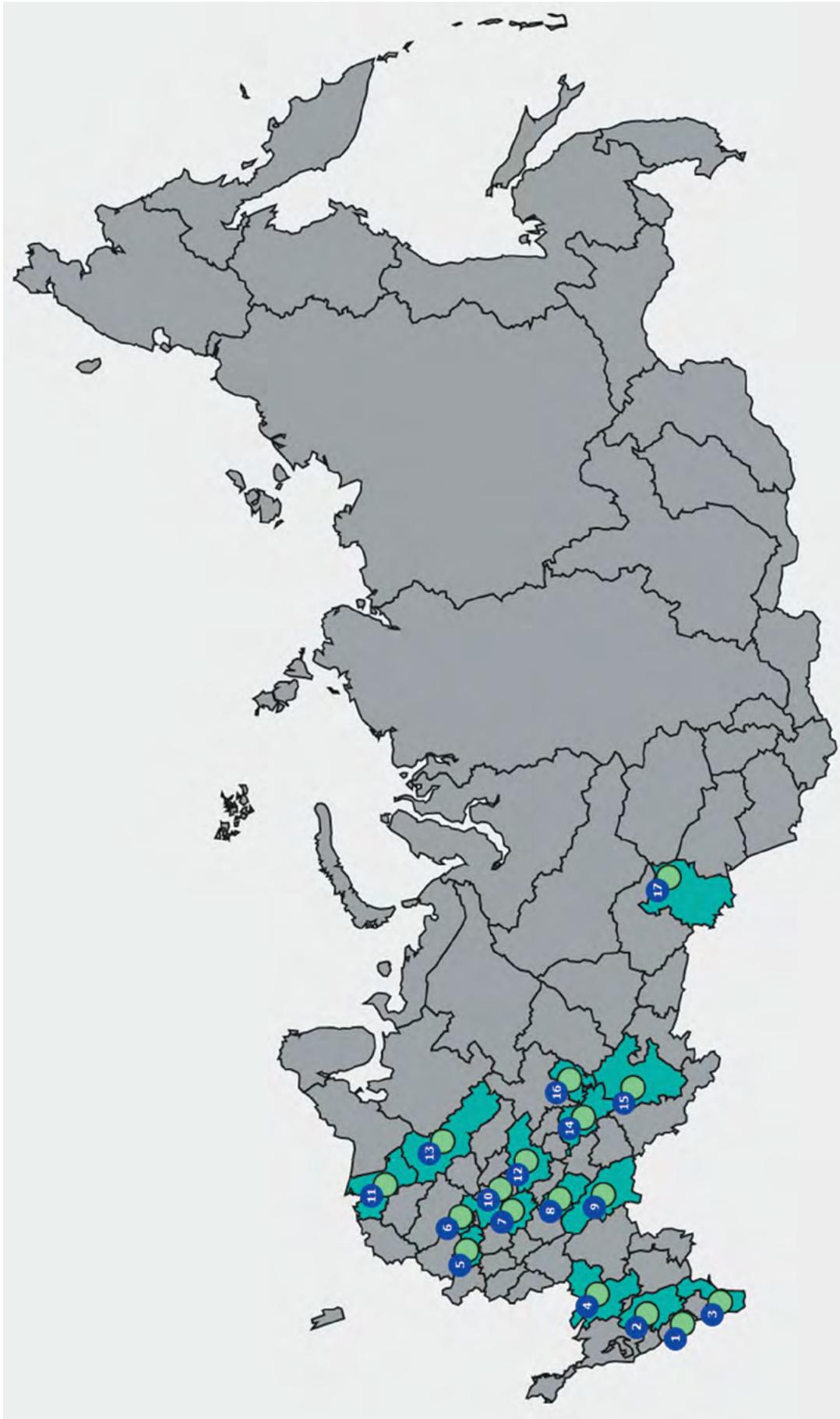


Рис. 11.2. Карта-схема основных производств листового и тарного стекла Российской Федерации

ИСТОРИЯ ЗАРОЖДЕНИЯ СТЕКОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Зарождение стекольной промышленности в мире

Еще в каменном веке люди научились обрабатывать вулканическое стекло (обсидиан), из него делали наконечники стрел, копий и другого режущего инструмента (см. рис. 11.3).



Рис. 11.3. Наконечник из обработанного обсидиана

Но когда и где и как было получено первое искусственное стекло? Точного ответа на этот вопрос нет до сих пор. Ученые сходятся во мнении, что родиной обработки стекла является сирийское побережье (Месопотамия, Финикия или Древний Египет), конкретнее указать не представляется возможным — между данными территориями было налажено слишком тесное взаимодействие.

Наиболее ранняя «теория» происхождения стекла предложена римским ученым Плинием Старшим в «Естественной истории»: «Однажды, в очень далекие времена, финикийские купцы везли по Средиземному морю груз добытой в Африке природной соды. На ночлег они

высадились на песчаном берегу и стали готовить себе пищу. За неимением под рукой камней обложили костер большими кусками соды. Поутру, разгребая золу, купцы обнаружили чудесный слиток, который был тверд как камень, горел огнем на солнце и был чист и прозрачен как вода. Это было стекло».

Эта «теория» является, скорее, красивой легендой, так как образование стекла на открытом пламени простого костра невозможно. Скорее всего, стекло стало побочным продуктом при производстве керамики или металлов.

Открыв для себя новый удивительный материал, люди начали изучать его свойства и внедрять в свою жизнь. Одними из первых обнаруженных изделий из стекла стали украшения.

Наиболее древние фрагменты стеклянных изделий, обнаруженных при археологических раскопках, датируются III тысячелетием до н. э. (рис. 11.4).



Рис. 11.4. Стеклянные бусы

Исходным сырьем для изготовления стекла служили песок, известь и щелочь — органическая (зола растений) либо неорганическая (сода).

Древнеегипетские стеклоделы не умели получать прозрачное стекло, ведь для этого нужна температура около 1500°С, поэтому первые бусины были окрашены в разные цвета.

Стекло окрашивали, добавляя в состав различные компоненты. Особенно распространены были голубое и бирюзовое стекло, окрашенное медью, а зеленое стекло получали окрашиванием медью и железом.

Ученые восстановили в общих чертах технологию стеклоделия Древнего Египта по фрескам и руинам стекольных мастерских.

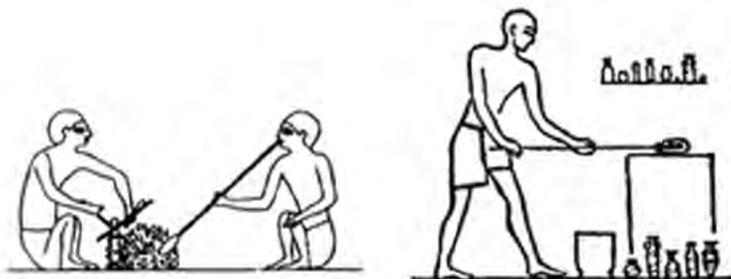


Рис. 11.5. Процесс изготовления стекла, Древний Египет

Следующим шагом стало изготовление посуды из стекла. На фото ниже древнейший стеклянный кубок фараона Тутмоса III (1450 до н. э.).

Хотя к XV в. до н. э. стекло массово производилось не только в Египте, в Передней Азии и на Крите, только к IX в. до н. э. были открыты технологии производства бесцветного стекла.

В каждом регионе существовали свои особенности производства стекла, мастерство и технологии передавались в строжайшей тайне от мастера к ученику. Первое известное «пособие» по стеклоделию датируется 650 г. до н. э. и представляет собой таблички, хранившиеся в библиотеке ассирийского царя Ашшурбанипала.

Во времена распространения греческой культуры на данные регионы произошло дальнейшее развитие технологии стеклоделия, что позволило производить стеклянные изделия большого размера, в том числе столовую посуду. В этот период бесцветное стекло начало цениться особенно высоко, были усовершенствованы технологии его изготовления.

Величайшим периодом в истории стекла (в период Римской империи) стало изобретение стеклудувной трубки сирийскими мастерами между 27 г. до н. э. и 14 г. н. э.; с ее помощью человек научился выдувать стекло и придавать стеклянным предметам желаемую форму и размер.

Изобретение выдувания составило основу не только древнего, но и современного методов изготовления стеклянной посуды, а впоследствии и оконного стекла!

Ранее метод выдувания являлся вспомогательным, но в этот период стал самостоятельным приемом и породил не одну сотню предметов искусства.

В то время Сирия находилась под протекторатом Римской империи, что поспособствовало расцвету стеклудувного дела и распространению его по всем провинциям.



Рис. 11.6. Кубок Тутмоса III

Примерно в это же время в Древнем Риме начали применять оконное литое стекло и стеклянные пластинки для облицовки стен. Его получали методом литья на плоскую каменную поверхность; качество такого стекла, конечно, не сравнить с современным.

Появление листового стекла подтолкнуло мастеров Византии к разработке технологии производства смальты — цветного стекла с добавлением в сырьевую стекломассу металлов (золото, медь, ртуть) в различных соотношениях. В Византии научились изготавливать несколько сотен различных цветов смальты, что существенно расширило возможности искусства мозаики.

Смальту отливали в листы или блины, кололи на относительно одинаковые кусочки и из них составляли мозаику.

Наиболее древние сохранившиеся образцы византийских мозаик относятся к III–IV вв.

Такие композиции из аккуратно выложенных мелких и более-менее одинаковых по размеру кубиков создали славу византийским мозаикам, которые пришли на смену римским, выполненным из мелких кубиков камня (рис. 11.7).

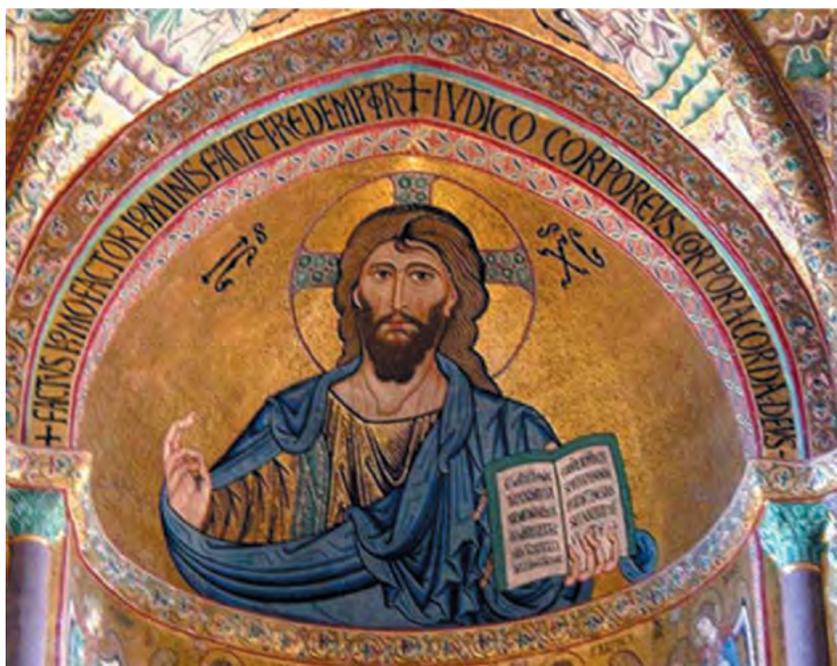


Рис. 11.7. Мозаика, Византия

Зарождение стекольной промышленности в России

Развитие стекольной отрасли в России датируется XVII столетием, когда в стране началось строительство стекольных заводов, освоение известных на тот период технологий стекловарения, освоение достаточно широкого ассортимента стекольных изделий.

Первый стекольный завод в России был построен в 1631 г. в селе Духамино в 50 км от Москвы.

В 1669 г. вошел в эксплуатацию завод стеклянной посуды в Измайлово.

В период 1706–1720 гг. в России было построено шесть стекольных заводов, в том числе пять заводов под Москвой и один на реке Гусь во Владимирской губернии. На заводе на Воробьевых горах российские стеклоделы освоили производство зеркального стекла площадью более 4,5 м². Во второй половине XIX в. в России строительство стекольных заводов, освоение существующих в мире технологий и становление российской школы ученых в промышленности, в том числе и стекольной, развивается интенсивно.

Уже в 1879 г. в России насчитывалось 173 стекольных заводов как казенных, так и частных.

В СССР продолжалось развитие стекольной отрасли, велось освоение новых технологий производства, создавались новые предприятия, внедрялось новое высокопроизводительное оборудование, расширялся ассортимент, в том числе с учетом нужд оборонной промышленности. К началу Отечественной войны СССР занимал одно из первых мест в мире. По производству оконного стекла СССР превзошел США.

Стекольная промышленность России является достаточно развитой в промышленном отношении отраслью, производящей широкий ассортимент стекольной продукции для различных отраслей народного хозяйства и бытовых целей.

Стекольная отрасль на производство стекла и стекольных изделий потребляет более 5,0% топлива, почти 9% электроэнергии, 7,5% минеральных ресурсов от общего их объема потребления в стране.

Более 8% грузооборота железнодорожного транспорта связано с перевозкой сырья и готовой продукции стекольной отрасли.

В стекольной отрасли занято до 500 тыс. человек.

В структуре стекольного производства следует выделить процессы стекловарения и последующей переработки для создания стеклянных изделий для отдельных отраслей народного хозяйства, оконного листового стекла для остекления промышленных объектов и гражданского строительства, стекла для автомобильного и рельсового транспорта, для производства мебели, производства тарного стекла, сортового стекла.

В настоящее время в России действует несколько заводов по производству флоат-стекла с 12 производственными линиями. В 2017 г. в России произведено 107 935 тыс. м листового стекла, флоат-стекло составляет основную массу продукции отечественных заводов.

Внедрение флоат-метода позволило существенно повысить качество стекла, расширить ассортимент продукции, производимой на основе флоат-стекла, учитывая возможность создания изделий любой формы при нагреве стекла, обрабатывать поверхность стекольного листа специальными покрытиями с целью регулирования освещенности, теплоизоляции, повышения безопасности и пр.

Массовое производство флоат-стекла высокого качества и снижение цены за счет роста производства значительно расширило область применения стекла в мире и в России.

ЭВОЛЮЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ И ЦИКЛЫ РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВА СТЕКЛА

Появление листового стекла в истории цивилизации не было революционным, а скорее, событием местного значения. Потребность в нем сформировалась с изменением устройства человеческого жилья и организации в нем комфортных условий жизни человека, а именно температуры и освещенности. За тепловые характеристики жилья в большей степени отвечают стены, полы и потолки зданий, а проникновение света возможно только через специально организованные отверстия — окна. Необходимость в дневном освещении внутренних помещений появилась тогда, когда люди начали строить многокомнатные жилища и появились книги. До этого времени отверстия в стенах были разной формы и служили для вентиляции или были сторожевыми, и в холодное время их закрывали шкурами или слюдой и другими прозрачными материалами. Известны случаи, когда в домах римских патрициев делали прямоугольные проемы, которые заполняли плоским литым стеклом. Оно было редким, дорогим, и позволить себе такую роскошь могли далеко не все состоятельные люди. Массовое остекление окон началось только в эпоху Возрождения, откуда и начинается новая эра существования листового стекла. Первые два этапа истории стеклоделия — древний, или египетский, этап до 100 г. до н. э. и римско-средневековый — были подготовительными и показали человечеству пользу от этого материала в устройстве жилищ и других строений.

Стеклоделы Древнего Египта в II тысячелетии до н. э. не знали о прозрачности материала, который они изобрели, поскольку первые стекла, с которыми они работали, были интенсивно окрашены в массу и имитировали природные камни. Основными методами формования в эту эпоху были методы пластического формования — навивания вязкой стекломассы на глиняно-песчаный сердечник для получения сосудов, или раскатывание ее на глиняной плите для получения заготовки для блюда или чаши. Египтяне отработали технологию литья прозрачной стекломассы на плоскую поверхность и получения плоских отливок массой не более 2 кг и толщиной от 6 до 10 мм незадолго до падения царства египетского. Размеры таких «оконных» стекол были не более чем 200 x 200 мм, и для того чтобы сквозь них было хоть что-то видно, их шлифовали и полировали.

Во времена Римской империи, до изобретения стеклодувной трубки, предпринимались попытки производства стеклянных зеркал. Для этого прозрачную стекломассу выливали на глиняную или каменную плиту, прокатывали, шлифовали и полировали, а затем наклеивали металлическую пластинку или фольгу. Однако эта технология не получила широкого распространения, поскольку получить пластинку из прозрачного бездефектного стекла было сложнее, чем отполировать бронзовую или медную пластинку.

Технология лунного стекла, которая появилась с изобретением стеклодувной трубки на рубеже Старой и Новой эры, дала новый толчок к появлению оконного стекла.

Изготовление плоского стекла происходило следующим образом. На стеклодувную трубку из стекловаренного горшка брали порцию горячей стекломассы и выдували стеклянный шар. Затем сплющивали горячее стекло, перемещая конец стеклодувной трубки с шаром вверх под действием силы тяжести, и прикрепляли к центру плоской части понтию¹. После отделения стеклодувной трубки заготовку в виде эллипсоида разогревали в печи и с помощью действия центробежной силы, возникающей при вращении, и дощечек-гладилок добивались полного разворачивания заготовки в плоский диск диаметром от 500 до 700 мм. Затем понтию отделяли и диск отжигали. В центре полученного диска было утолщение и след от удаления понтии, который шлифовали и полировали. Толщина диска уменьшалась от центра к краю, иногда на нем оставались концентрические круги, образовавшиеся при вращении заготовки, однако стекло получалось тонким и прозрачным, через него можно было смотреть и из него можно было вырезать прямоугольники или квадраты для вставления в оконные рамы. В Древнем Риме появились дома, принадлежащие патрициям, с застекленными окнами.



Рис. 11.8. Производство лунного стекла

¹ Понтия — стальной стержень с приваренным к одному концу диском, к которому прикрепляется выдутое изделия для отделки горла, ручек и ножек и переноски его в печь отжига.

После крушения Римской империи, в раннее Средневековье — эпоху зарождения государств Европы, интерес к листовому оконному стеклу снизился. Но для строительства христианских и католических храмов понадобился материал, украшающий оконные проемы. Особенностью устройства церковных сооружений является необходимость света в алтарной части храма и полумрак в остальных частях. Для таких окон нужно было не прозрачное, а цветное стекло с неровной поверхностью. Этим требованиям вполне удовлетворяло стекло, полученное методом ручного проката отливки на плоской поверхности.

Таким образом, история оконного, в современном понимании, стекла началась в эпоху Возрождения с технологии холявного стекла, когда выдутый с помощью стеклодувной трубки цилиндр разрезали по высоте, разворачивали и получали прямоугольные листы. И тогда прямоугольный оконный проем со стеклом становится неременной архитектурной деталью практически всех зданий и сооружений.

Технология листового стекла, способная обеспечить оконным и зеркальным стеклом дома не только представителей высших слоев и сословий, появилась в эпоху Возрождения усилиями стеклоделов Венецианской республики. К этому времени были усовершенствованы приемы варки, позволяющие получать прозрачное бесцветное стекло хорошего качества, высокой белизны и с минимальным содержанием пороков стекловарения. Кроме того, технологии полых изделий из стекла были доведены до немыслимого совершенства. И немало важно, развитие городов требовало прозрачных материалов для заполнения оконных проемов. Сочетание этих факторов и породило технологию получения листов стекла более совершенного качества, чем из лунного стекла.

Последовательность приемов была следующая. На стеклодувную трубку набирали не менее 10 кг горячей стекломассы и выдували цилиндр диаметром не менее 400 мм с толщиной стенки 4–5 мм. Затем его укладывали на специальную платформу, отрезали стеклодувную трубку и нижнюю закругленную часть и разрезали вдоль оси. После чего на платформе закатывали в печь, разогревали до температуры выше требуемой для стеклования и разворачивали с помощью специальных приспособлений сначала в печи, а потом уже на воздухе, чтобы зафиксировать форму листа. Затем листы отжигали в печах отжига и резали на необходимые размеры. Поскольку все перемещения листов стекла в горячем и холодном состоянии осуществляли вручную, важно было не нанести царапин на их поверхность и не ухудшить качество формования.

Цилиндры можно было делать широкими, с диаметром более 1000 мм, и короткими, длиной не более 500 мм, тогда длина листа определялась длиной окружности. Если цилиндры выдували диаметром не более 500 мм и длиной до 2000 мм, то длина листа была длиной цилиндра, а ширина — длиной окружности.

В XX в. механизация добралась и до методов формования плоского стекла: вертикального (метод Фурко) и горизонтального (метод Кольберна) вытягивания, непрерывного проката и плавающей ленты (флоат-способ). Механизация производства листового стекла позволяет удовлетворять непрерывно растущий спрос на него в связи с разработкой новых видов продукции и новых областей применения.

История бутылки начинается в Древнем Египте с производства парфюмерной тары — сосудов для благовоний — методами пластического формования. Остановимся подробнее на развитии стеклоделия к началу I тысячелетия до н. э. В начале II тысячелетия до н. э. составы стекол остаются многощелочными в сравнении с современными. Содержание оксидов натрия и калия в них остается на уровне 30, известь — карбонат кальция — вводится в количестве не более 4–5 и на долю песка — оксида кремния — приходится порядка 65 мас.%. К началу периода Античности составы стекол, которые унаследовали стеклоделы Римской империи, содержат около 65–75% кремнезема, 20% оксида натрия и 8% оксида кальция, т. е. содержание основных компонентов в них приближается к показателям, характерным для современных составов стекол. В состав стекла вводят вспомогательные материалы: оксид свинца для увеличения длины стекла, оксид олова для получения молочных стекол и оксиды

марганца, кобальта и сурьмянокислый свинец для получения фиолетовых, синих и желтых стекол.

Технологии варки стекол этого периода удалось установить благодаря раскопкам в местности, расположенной в среднем течении Нила под названием Тель-эль-Амарна. Там было раскопано несколько стекольных мастерских с остатками оборудования, по которым удалось восстановить технологию двухстадийной варки стекол.

Первоначально для варки стекла использовали глиняные горшки, ширина которых была много меньше высоты. В них можно было получить до 1 кг стекломассы. На рубеже I и II тысячелетий до н. э. появляется двухстадийная варка стекла, разделяющая этапы силикато- и стеклообразования с осветлением и гомогенизацией. На первом этапе шихту сплавляли в высоких горшках, затем их разбивали, вынимали наиболее оплавленные куски, которые складывали в плоские чаши. На втором этапе производили варку в тонком слое, что позволяло более успешно завершить процессы стеклообразования, снизить количество газовых пузырей в готовом стекле и в целом повысить качество получаемой стекломассы.

Для плавления шихты использовали пламя костра, который разводили в специально выкопанной яме, для того чтобы было удобней регулировать температуру варки. Максимальные температуры, которые можно получить в таких условиях, не превышали 850–1000°С. Впоследствии место, где варили стекло, стали окружать стенами, что позволяло несколько увеличивать и сохранять температуру пламени. Вспомогательными рабочими инструментами служили черпаки, металлические и глиняные, ножницы и палочки для отделения порций стекломассы, глиняные формы и плиты для отливки изделий.

Первые технологии формования сосудов были заимствованы из распространенной в то время технологии изготовления керамических изделий без гончарного круга. Из влажной, хорошо размятой глины делали колбаску диаметром 15–20 мм, укладывали ее вертикальными слоями для получения изделия нужной формы, выглаживали внутреннюю и внешнюю поверхности и обжигали.

Понятно, что лепить руками из жгутов горячей пластичной стекломассы было невозможно, поэтому **первым методом** изготовления бусин разного размера и узкогорлых полых стеклянных изделий — сосудов для масла, косметических средств и благовоний, стал разработанный египетскими мастерами метод **навивания на песчаный сердечник**.

Основными инструментами для изготовления изделий этим методом были две деревянные округлые палки или тростниковые трубки. Одна, длиной не менее 1000 мм, конец которой — сердечник, длиной около 200 мм, был обмазан смесью глины с песком, служила основой для изготовления изделий. Другая — для окунания в горшок за порцией стекломассы. Диаметр сердечника у палки-основы соответствовал диаметру отверстия бусины или внутреннему диаметру сосуда.

Порцию горячего стекла подносили к глиняному сердечнику, прикрепляли и начинали вытягивать нить, которую сразу же плотно наматывали на сердечник. Нужную форму бусине или сосуду придавали путем варьирования количества слоев стекломассы в разных частях изделия. После окончания навивания изделие на короткое время помещали в пламя костра для огненной полировки поверхности, остужали на воздухе и выкручивали палку-основу. Характерной особенностью таких изделий является несоответствие их внутренней и наружной форм.

Главным приемом украшения сосудов для благовоний было навивание на их поверхность тонких стеклянных цветных нитей и «расчесывание» их специальными деревянными гребнями.

Следующий период развития технологии стекла назван **римским**, поскольку основное завоевание этого цикла было совершено на территории Римской империи в I столетие до н. э.

Предшествовало этому изобретению распространение стеклянных изделий как дорогостоящего товара по обе стороны от Средиземного моря и активное освоение и развитие

стеклоделия в Древней Греции. Стеклоделы северного побережья использовали для изготовления стекла свои природные материалы и, таким образом, произвели замену щелочного компонента в составе стекла, а именно натрия на калий. Как известно сегодня, увеличение содержания иона калия приводит к увеличению длины стекла и расширению температурного интервала формования. Изменение состава стекла, повышение температуры пламени в закрытых плавильнях с использованием поддува воздуха привело к получению хорошо проваренных, слабо окрашенных однородных стекол, вполне пригодных для изготовления тонкостенных изделий. Оставалось только изобрести способ, который позволял бы их изготавливать. И такой способ появился, хотя имя автора изобретения так и осталось неизвестным.

Изобретение стеклодувной трубки с полным правом называют первой революцией в технологии стекла, поскольку, как впоследствии было показано, с ее помощью можно изготавливать любые виды изделий, практически без ограничения форм и размеров.

В эпоху расцвета Римской империи, а именно за пару столетий, на рубеже старой и новой эры, были разработаны основные приемы **свободного выдувания** и **выдувания в формы** полых и плоских стеклянных изделий.

Однако нельзя сказать, что с появлением метода выдувания стеклянная бутылка стала предметом массового спроса. Традиции хранения продуктов того времени предполагали использование глиняной посуды для хранения и металлических — для сервировки стола. Для воды использовали деревянные бочки, тыквенные или керамические бутылки или кожаные меха. Воины, охотники или крестьяне носили с собой напитки на поясе или приторачивали к седлу. Поэтому стеклянная бутылка без ушек, цилиндрической формы, запечатанная сургучом или воском, не пользовалась спросом ни во времена Римской империи, ни в раннем Средневековье. К началу эпохи Возрождения нормой стали изделия из бесцветного прозрачного стекла, моду на которые утвердила Венецианская республика. Белизну стекла обеспечивало использование чистых песков, обесцвечивателей, вводимых в состав шихты, и соблюдение окислительно-восстановительных условий варки стекол.

Венецианцы внесли неоценимый вклад в технологии производства сортового и листового стекла. Что касается стеклянной бутылки, то венецианские мастера занимались эксклюзивной стеклянной тарой — выдували бутылки в металлические формы с рельефом, изображающим батальные или пасторальные сцены, орнаменты, портреты и т. п. По сути, они стояли у истоков нанесения на бутылки фирменного клейма в процессе ее формования.

История распространения стеклянной бутылки неразрывно связана с историей виноделия, особенностями разных видов виноградных напитков и способами их создания и хранения.

Заводское производство стекла в России началось в 1635 г.. Примерно в то же время освоили и выпуск бутылок. Первая отечественная бутылка была выпущена на стекольном заводе, построенном в районе нынешней подмосковной станции Истра, и предназначалась только для аптекарских целей.

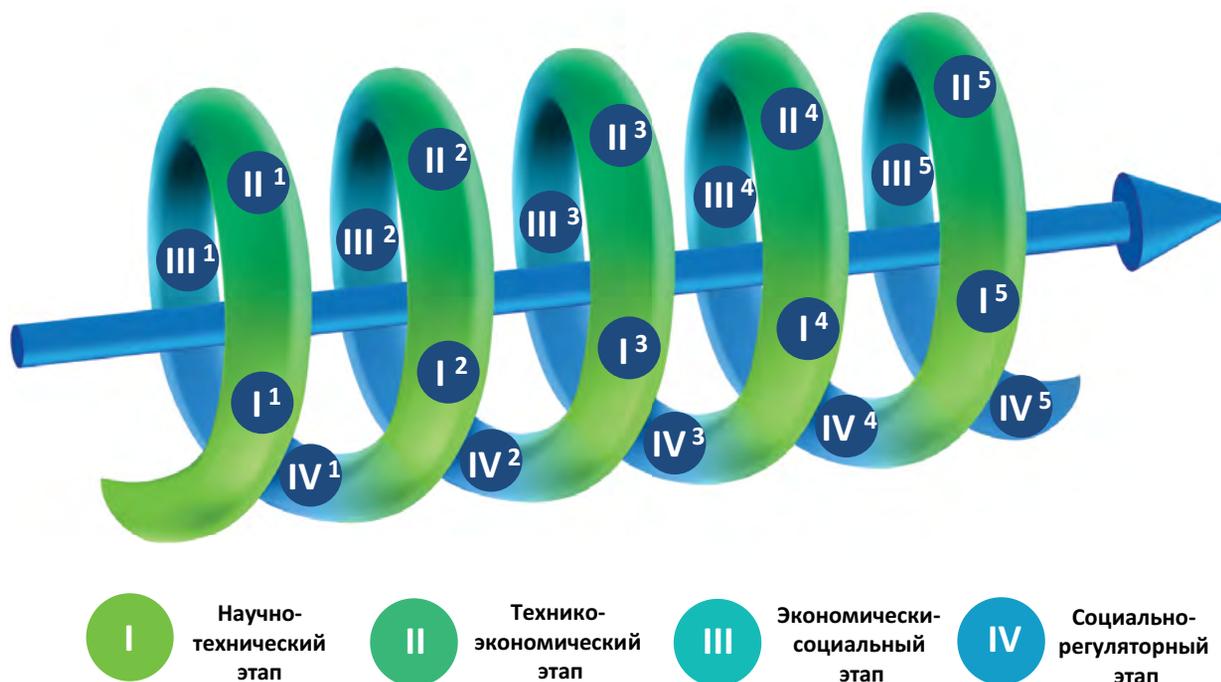
Эволюция технологий производства стекла

Каждый цикл обусловлен определенным этапом, который дает новый толчок к развитию технологий. Последовательное прохождение всех этапов приводит к завершению цикла развития отрасли, после чего цикл повторяется.

Ресурсоэффективность в рамках исторического развития отраслей промышленности рассматривается как важнейший фундаментальный концепт перехода технологического развития на новый уровень. При этом метод исследования сосредоточен на изучении реакции отрасли как целого на изменяющиеся условия, без подробного описания механизма работы и внутреннего устройства той или иной технологии, так как в рамках поставленной задачи это не является первостепенным объектом изучения (табл. 11.5, рис. 11.19).

Таблица 11.5. Основные этапы технологических циклов развития производства стекла

Период	Цикл	Научно-технический этап	Технико-экономический этап	Экономический-социальный этап	Социально-регуляторный этап	Основные источники энергии	Технологические лидеры
IV тыс. до н. э. — 500-е гг. до н. э.	Первый	Появление первых горшковых печей	«Египетская печь»	Украшения — бусы, браслеты; глазурированные керамические фигурки, сосуды для благовоний; чаши и блюда	Ремесленное производство стекла при дворах фараонов и крупных храмовых центрах	Дерево, травянистые растения	Египетское царство
500-е гг. до н. э. — 448 г. н. э.	Второй	Изобретение стеклодувной трубки	Закрытая зона варки, поддув воздуха для увеличения температуры пламени	Бесцветная стеклянная посуда, посуда из цветного стекла, стеклянная тара, плоское лунное стекло и отливки с подпрессовкой или «прокатом»	Образование бригад стеклодувов, рост количества производителей стекла	Теплоноситель — дрова, возможно уголь	Римская империя
XII–XV вв.	Третий	Холявный метод изготовления листового стекла. Новые методы декорирования (накладное стекло; атласное стекло; венецианская нить; миллефиори; кракле; пузыри в стекле)	Многогоршковые закрытые печи с нижним подводом пламени, горшки из огнеупорной глины	Тонкостенная декоративная сортовая посуда из цветного и бесцветного стекла. Узкогорлая стеклянная тара, в том числе аптекарская. Зеркала из плоского стекла, полученного холявным методом, люстры	Первые мануфактуры	Дрова, уголь	Венецианская республика
XVI–XVIII вв.	Четвертый	Варка хрустальных стекол. Методы холодной обработки хрустальных изделий: гранение и резьба	Многогоршковые печи с нижним подводом пламени	Посуда из бесцветных и накладных стекол с высоким показателем преломления, украшенная резьбой, гранением и гравированием	Переход от мануфактур к частичной механизации	Дрова, черный и бурый уголь, торф	Богемия, Франция, Англия
XIX–XX вв.	Пятый	Метод Фурко, метод Кольберна, флоат-процесс	Регенеративная стекловаренная печь. Машина для вытягивания листа стекла. Карусельный автомат для выдувания бутылки	Рост производства листового стекла	Промышленное производство, автоматизация	Уголь, природный газ	Германия, Бельгия, США, Великобритания



- I** — Научно-технический этап
- II** — Техно-экономический этап
- III** — Экономически-социальный этап
- IV** — Социально-регуляторный этап
- I¹** — Появление первых горшковых печей
- II¹** — «Египетская печь»
- III¹** — Украшения — бусы, браслеты; глазурованные керамические фигурки, сосуды для благовоний; чаши и блюда
- IV¹** — Ремесленное производство стекла при дворах фараонов и крупных храмовых центрах
- I²** — Изобретение стеклодувной трубки
- II²** — Закрытая зона варки, поддув воздуха для увеличения температуры пламени
- III²** — Бесцветная стеклянная посуда, посуда из цветного стекла, стеклянная тара, плоское лунное стекло и отливки с подпрессовкой или «прокатом»
- IV²** — Образование бригад стеклодувов, рост количества производителей стекла
- I³** — Холявный метод изготовления листового стекла. Новые методы декорирования (накладное стекло; атласное стекло; венецианская нить; миллефиори; кракле; пузыри в стекле)
- II³** — Многогоршковые закрытые печи с нижним подводом пламени, горшки из огнеупорной глины
- III³** — Тонкостенная декоративная сортовая посуда из цветного и бесцветного стекла. Узкогорлая стеклянная тара, в том числе аптекарская. Зеркала из плоского стекла, полученного холявным методом, люстры
- IV³** — Первые мануфактуры
- I⁴** — Варка хрустальных стекол. Методы холодной обработки хрустальных изделий: гранение и резьба
- II⁴** — Многогоршковые печи с нижним подводом пламени
- III⁴** — Посуда из бесцветных и накладных стекол с высоким показателем преломления, украшенная резьбой, гранением и гравированием
- IV⁴** — Переход от мануфактур к частичной механизации
- I⁵** — Метод Фурко, метод Кольберна, флоат-процесс
- II⁵** — Регенеративная стекловаренная печь. Машина для вертикального вытягивания листа стекла. Карусельный автомат для выдувания бутылки
- III⁵** — Рост производства листового стекла
- IV⁵** — Промышленное производство, автоматизация

Рис. 11.19. Эволюция технологий производства стекла

ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ

Современный мир озадачен проблемой рационального использования природных ресурсов и снижения вредного воздействия на окружающую среду. Для решения этих проблем необходимо соответствующим образом подходить к современным технологиям, особенно когда они касаются многотоннажных и энергозатратных производств, таких как производство стекла. Но прежде чем анализировать современные производства, необходимо разобраться в вопросах их возникновения и формирования, поскольку невозможно что-то менять в привычном порядке действий, если не знаешь, по каким причинам этот порядок именно такой.

Наибольший объем производства изделий из стекла приходится на стеклянную тару, затем идет листовое стекло, затем сортовое и большая группа специальных стекол, куда относятся и оптические стекла, и медицинские, и электровакуумные, и стекловолокно и т. д.

В производстве стекла существует единая технологическая схема — последовательность основных операций, которая эффективна при получении большинства видов изделий. Поэтому анализировать и сравнивать технологии целесообразно именно по ним.

Мы выделим в технологии стекла следующие основные переделы:

- **сырьевые материалы**, требования к ним, методы подготовки, составление шихты и ее подача в стекловаренную печь;
- **варка стекла**, стадии процесса стекловарения, влияние состава стекла на условия варки, температурно-временные режимы варки, типы печей, их конструктивные особенности и эффективность работы;
- **формование изделий**, способы формования и виды получаемых с их помощью изделий, отжиг изделий, критерии и способы оценки их качества.

Технология листового стекла

Листовое стекло сегодня — это обширная отрасль промышленного производства, включающая как изготовление самого стекла, так и переработку его в материалы, обладающие разным сочетанием физико-химических, оптических, механических и других специальных свойств (рис. 11.9).



Рис. 11.9. Ассортимент специальных стекол, производимых на основе листового стекла

Из материала, традиционно используемого для оконного остекления и изготовления зеркал, стекло превратилось в многофункциональный конструкционный материал благодаря разработке целого ряда видов и технологий нанесения покрытий, ламинирования, декоративной обработки и т. п. Достаточно сказать, что все современные гаджеты оснащены тонкими и плоскими стеклянными экранами. Сегодня большинство заводов, выпускающих листовое стекло, наряду с «сырым» бесцветным, прозрачным, необработанным стеклом, выпускают один или несколько видов специальных стекол.

Основные потребители листового стекла — это строительная отрасль и машиностроение; кроме того, есть целый ряд специальных стекол, применение которых не столь широко. Существует несколько классификаций листовых стекол: по габаритным размерам, ведущим свойствам, областям применения и т. д.

Строительство: сегодня львиная доля стекла, применяемого в строительстве, используется для изготовления стеклопакетов, где основа по-прежнему бесцветное прозрачное листовое стекло с высоким светопропусканием. Однако появились такие популярные позиции, как структурное остекление фасадов, стеклянные стены, полы и потолки и даже лестницы. Вот основной перечень и краткая характеристика используемых для этих целей стекол:

- **листовое (оконное)** — бесцветное прозрачное стекло, изготавливается флоат-методом, используется для остекления оконных проемов, толщина 2–6 мм, светопропускание не менее 85–90%;
- **витринное** — бесцветное прозрачное стекло, изготавливается флоат-методом, с идеально полированной поверхностью, используется для остекления витрин и стеллажей в торговых и выставочных залах, толщина 6–10 мм;
- **армированное** — бесцветное безопасное стекло, изготавливается методом проката с запрессовкой в расплавленную стекломассу металлической сетки, используется для изготовления фонарей, дверей, межкомнатных и разделительных перегородок, толщина 6–8 мм;
- **узорчатое** — бесцветное или окрашенное в массу стекло с рельефной поверхностью, изготавливается флоат-методом или методом непрерывного проката, используется для изготовления дверей, перегородок, толщина от 4 до 6 мм;
- **теплопоглощающее** — бесцветное прозрачное стекло со специальным металлическим или оксидно-металлическим покрытием, регулирующим потери тепла, используется для остекления оконных проемов и структурного остекления зданий, толщина от 3 до 4 мм;
- **закаленное** — бесцветное прозрачное безопасное стекло или стекло с функциональным покрытием, упрочненное методом воздушной закалки, имеет прочность при изгибе в 5–8 и термостойкость в 2 раза выше, чем у обычного стекла, используется для структурного остекления, изготовления перегородок, полов, лестниц и т. п., толщина от 3 до 8 мм;
- **стемалит** — бесцветное прозрачное стекло с цветным прозрачным или глухим эмалевым покрытием, предназначено для облицовки стен, строительства перегородок и другой внутренней и наружной декоративной отделки, толщина от 6 мм;
- **матированное** — бесцветное прозрачное стекло с пониженным светопропусканием, поверхность которого обработана методами химического или абразиво-струйного матирования, толщина от 3 до 6 мм;
- **самоочищающееся** — бесцветное прозрачное стекло с реакционно-активным покрытием, очистка его поверхности от пыли и грязи происходит под действием воды и солнечного освещения, толщина от 3 до 6 мм;
- **пожаростойкое** — прозрачное бесцветное термостойкое стекло, собрано в стеклопакет, в котором пространство между стеклами заполнено кремнийорганическим мономером, он полимеризуется при температуре выше 300°С, стекло теряет прозрачность и препятствует распространению инфракрасного излучения, толщина одного стекла в стеклопакете не менее 4 мм.

Машиностроение: плоское и гнутое стекло используют для остекления всех видов гражданского и военного наземного, водного и воздушного транспорта благодаря высокому светопропусканию в заданной области спектра и достаточной прочности. Использование закаленных и ламинированных стекол решает проблему безопасности водителей, пассажиров и окружающих людей при разрушении стекла. Перечень стекол, используемых в машиностроении:

- **закаленное** — характеристики см. выше, используется для остекления боковых окон в различных транспортных средствах, толщина от 4 мм;
- **триплекс** — бесцветное прозрачное плоское или гнутое многослойное стекло, полученное путем склеивания двух стекол с помощью бесцветной полимерной пленки, используют в качестве лобовых, боковых и задних окон в различных транспортных средствах, возможно соединение прозрачного и тонированного листового стекла, общая толщина конструкции не менее 6 мм;
- **тонируемое** — цветное листовое стекло, окрашенное в массу, или бесцветное листовое стекло с цветным пленочным покрытием (прозрачным или зеркальным), как правило, предварительно закаленное, используется как для остекления боковых окон в транспортных средствах, так и в многослойных стеклах для лобовых и задних окон, толщина от 3 мм.

Кроме того, сегодня листовое стекло широко используют в мебельной промышленности для изготовления стеклянных дверей, столешниц, а иногда стульев и кресел. Очень востребованы стекла в интерьере — кроме традиционных зеркал используют специальные стекла для картин и фотографий, стекла с переменным светопропусканием, стекла для телевизионных экранов и других средств отображения информации. Приведем некоторые примеры таких стекол:

- **умное (smart window)** — бесцветное или окрашенное в массу листовое стекло, в состав которого введены компоненты, изменяющие его светопропускание под действием внешних условий — фотохромные, электрохромные, стекла-шпионы, или нанесены покрытия с жидкими кристаллами — телевизионные экраны, толщина не менее 4 мм;
- **стекло для дисплеев гаджетов** — бесцветное упрочненное листовое стекло толщиной не более 2 мм;
- **антибликовое** — бесцветное листовое стекло с покрытием, показатель преломления которого ниже, чем показатель преломления стекла, обладает более низким поверхностным отражением, чем обычное, используется для остекления картин, фотографий и т. п., толщина не более 3 мм.

Производство листового стекла относится к ресурсоемким и энергоемким, поскольку для него необходимы природные материалы: песок, мел, известняк, доломит и полевой шпат, и синтетические: сода, поташ, карбонаты щелочноземельных и других металлов, в зависимости от состава стекла. Наиболее распространенным энергоносителем для отапливания стекловаренных печей является природный газ, а для работы остального оборудования технологической линии необходима электроэнергия. Кроме того, в производстве используется вода для охлаждения устройств, обслуживающих стекловаренную печь, и мешалок, установленных между зонами варки и студки стекломассы.

Отходами производства являются:

- газообразные — оксиды серы, углерода и азота, поступающие в окружающую атмосферу из дымовой трубы стекловаренной печи;
- полужидкие — шлам от механической обработки (резка, шлифование, полирование), содержащий пылевидные частицы стекла, частицы абразивного инструмента и полировальных паст;
- твердые — пылевидные частицы сырьевых материалов, огнеупорные материалы после текущего и холодного ремонта печи.

Сегодня во всем мире выпускают листовое стекло толщиной от 1 до 25 мм, длиной от 500 до 6000 мм и шириной от 400 до 3210 мм.

Все плоское стекло, производимое вплоть до XVI в., были крайне дорого и дефицитно, поэтому использовалось, как правило, для остекления жилищ состоятельных людей, правителей или храмов. С появлением и распространением холявного метода оконное стекло становится более доступным и постепенно приобретает широкое распространение. Вместе с тем вредность производства стекла и трудоемкость изготовления большого количества листов сдерживало повсеместное использование оконного стекла. На помощь пришел научно-технический прогресс, и в начале XX в. бельгийский изобретатель Э. Фурко запатентовал способ механизированного вытягивания листового стекла.

Метод вертикального (Фурко) и горизонтального (Кольберн) вытягивания

Суть метода вертикального вытягивания сводится к тому, что в расплавленную стекломассу погружают так называемую «лодочку» — специальное керамическое тело с продольной щелью (рис. 11.10 б). Металлическую затравочную рамку опускают в щель, поднимают и при этом вытягивают стекломассу, которая прикрепилась (прилипла) к рамке и по мере подъема вытягивается в непрерывную ленту. Вытяжка производится в специальной вертикальной шахте, оснащенной устройствами, не позволяющими ленте деформироваться. На выходе из шахты лента стекла подается в печь отжига и затем на линию механизированной резки. Качество стекла, полученного этим способом, зависит от однородности распределения температуры стекломассы в подмашинной камере.

Метод Фурко быстро распространился по всей Европе, так как позволял выпускать значительное количество листового стекла. Качество поверхности полученного этими методами стекла было недостаточно высоким, и поэтому для получения изделий с высоким качеством поверхности (витрин и зеркал) его подвергали механической обработке (шлифованию и полированию). Толщина тянутого стекла составляла от 2 до 12 мм.

Другой способ вертикально-горизонтального вытягивания листового стекла разработал и реализовал американец Ирвинг Кольберн в 1916 г. Он отличался от метода Фурко тем, что на высоте 60 см от поверхности стекломассы лента перегибалась через отполированный валик и двигалась уже в горизонтальном направлении (рис. 11.10 а).

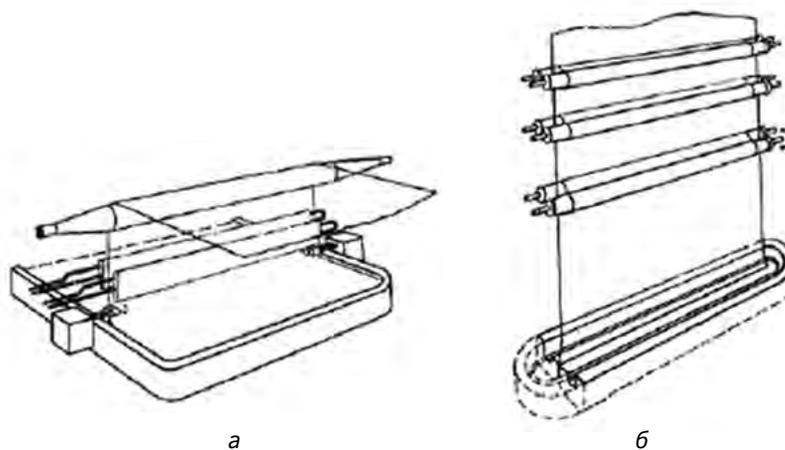


Рис. 11.10. Производство стекла методом вытягивания:

а) вертикально-горизонтальное вытягивание; б) вертикальное вытягивание

Однако изготовленное методами лодочного и вертикально-горизонтального вытягивания листовое стекло имело один существенный недостаток — волнистость, не обнаруживаемую визуально, которая проявлялась в искажении предметов, находящихся за стеклом. С целью улучшения качества стекла в 1928–1930 гг. был изобретен безлодочный способ вертикального вытягивания стекла, основанный на создании направленного потока стекломассы за

счет поднятия или опускания специального «поплавка». Качество стекла, полученного таким способом, было выше, но технологически его выпуск был более сложным.

Сегодня метод вертикального вытягивания используют для получения стекол толщиной менее 2 мм.

Метод непрерывного проката

Методом непрерывного проката получают узорчатое и армированное стекло. Процесс изготовления заключается в формировании непрерывной ленты стекла путем продавливания стекломассы с температурой около 1200°С между двумя вращающимися валками. Валки могут быть полированными, тогда получают прозрачное стекло, или рифлеными, тогда одна поверхность листа становится рифленой или узорчатой. Если одновременно со стекломассой между валками поместить сетку, то получится армированное стекло. Толщина прокатного стекла бывает от 3 до 15 мм.

Метод плавающей ленты. Флоат-способ

В середине XX в. прогресс в науке, промышленности и общественной жизни привел к тому, что высококачественного листового стекла стало не хватать, поэтому на смену методу вертикального вытягивания стекла пришел принципиально новый метод, дающий идеально плоский лист стекла. Это метод плавающей ленты, или флоат-метод (см. рис. 11.11).

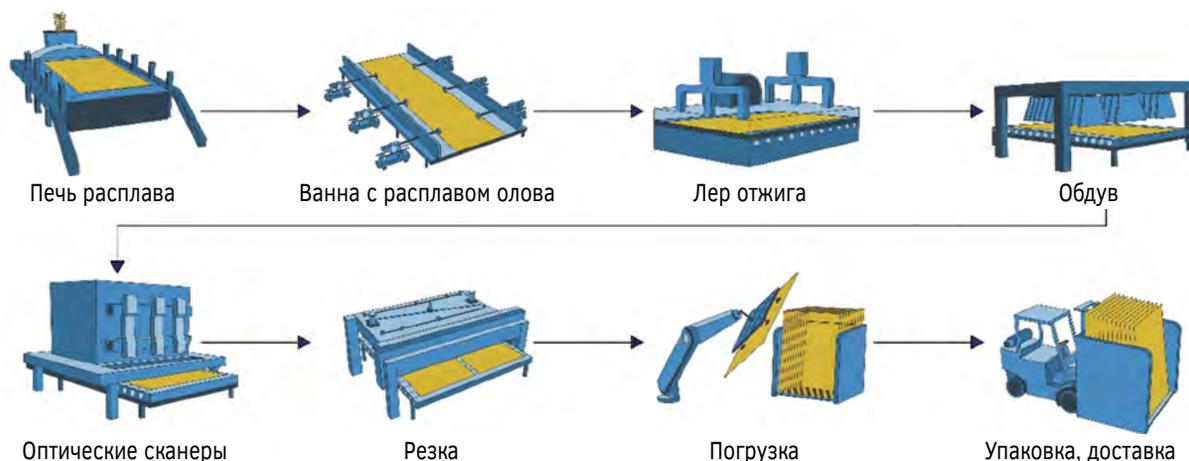


Рис. 11.11. Производство листового стекла флоат-методом

Идею получения листового стекла на расплаве олова придумали американцы В. Хилл и А. Хичкок, но до промышленного внедрения ее не довели. Флоат-метод производства листового стекла был доработан и внедрен в производство британской компанией Pilkington в 1950-е гг. и произвел переворот в стекольной промышленности. С тех пор он стал основным в производстве листового стекла во всем мире. Его популярность связана с высокой производительностью и высоким качеством поверхности стекла без какой-либо дополнительной обработки.

Формование происходит в ванне с расплавом олова, которую называют флоат-ванной. Стекломасса при температуре около 1050°С из студочной части стекловаренной печи попадает на сливной порог, через который выливается на поверхность расплава олова флоат-ванны. Обе поверхности ленты формируются с помощью сил поверхностного натяжения на границах стекло / олово и стекло / инертная атмосфера и получаются идеально гладкими,

не требующими дополнительной механической обработки. Ширина и толщина ленты регулируется при помощи бортоформирующих роликов, скорости движения транспортера и постепенного снижения температуры до 800°С. Процесс формования и отжига ленты стекла идет в одной плоскости, что существенно снижает возможность ее деформации. Флоат-процесс дает возможность получать стекло толщиной от 0,5 до 25 мм, но в строительстве обычно применяются стекла от 2 до 19 мм.

Технология тарного стекла

Стекло тары, столь привычная сегодня, достаточно долго пробивала себе дорогу среди керамических и металлических изделий, чтобы стать наиболее доступным и удобным способом хранения жидких и твердых продуктов. К слову сказать, традиционные упаковочные материалы — металлы, керамика и стекло, которые получают с помощью высокотемпературных технологий, в настоящее время существенно уступают для этих целей полимерным материалам.

Основным преимуществом стеклянной тары перед металлической является высокая химическая стойкость стекла, которая дает возможность разливать и упаковывать в нее множество видов свежей и консервированной продукции с кислым и нейтральным рН среды. Керамика, так же как и стекло, обладает высокой устойчивостью к воздействию пищевых продуктов, однако стекло прозрачно и легко окрашивается в различные цвета, что создает более правильные условия хранения, в частности алкогольной продукции. Кроме того, стеклянная посуда имеет меньшую толщину стенки и скорость формования стеклянных бутылок и банок существенно выше, чем керамических.

Стекло тары по виду изделий делят на узкогорлую (бутылки) и широкогорлую (банки), а также на бесцветную и цветную. По областям применения различают узкогорлую тару для алкогольной, слабоалкогольной, безалкогольной и газированной продукции, а также бутылки для соусов и специй. Отдельной строкой идет парфюмерная стеклянная бутылка, или флакон для розлива духов, туалетной воды, одеколонов и другой парфюмерно-косметической продукции. Кроме того, существует стеклянная тара химического и медицинского назначения. Ее используют для хранения неорганических, органических и биологических твердых и жидких веществ и препаратов.

Широкогорлую тару из бесцветного стекла емкостью от 50 до 2000 мл используют для упаковки и хранения консервированной продукции — варений, солений, компотов и т. п., а также для хранения сыпучих продуктов — муки, круп, соли, сахара, специй и т. д.; для расфасовки детского питания.

Узкогорлая бутылка из бесцветного тарного стекла используется, главным образом, для крепких алкогольных напитков, таких как водка, коньяк, бренди, ликеры, наливки и настойки; емкость бутылок составляет от 100 до 1500 мл, горлышко может быть отформовано под корковую или полимерную пробку, винтовую крышку или крышку-дозатор.

Узкогорлая бутылка из цветного стекла (коричневая, зеленая, оливковая, синяя) — основная упаковка для пива и вина; бутылки для пива выпускаются емкостью от 300 до 500 мл, для вина — от 750 до 1000 мл, горлышко пивных бутылок отформовано под крышку твист-офф, винных — под пробку или винтовую крышку.

Узкогорлая толстостенная бутылка из бесцветного или цветного стекла для газированных напитков — минеральной воды, фруктовых и ягодных напитков, игристых, шипучих и шампанских вин; бутылки для воды, как правило, емкостью от 500 до 1000 мл, для остальных напитков — от 750 до 1000 мл, горлышко бутылок для воды отформовано под крышку твист-офф, для шампанских вин — под корковую или полимерную пробку и проволоочный крепеж «мюзле».

Широкогорлая бутылка из бесцветного стекла для соусов, уксуса и вина, емкостью от 300 до 1000 мл, горлышко отформовано под пробку или крышку твист-офф.

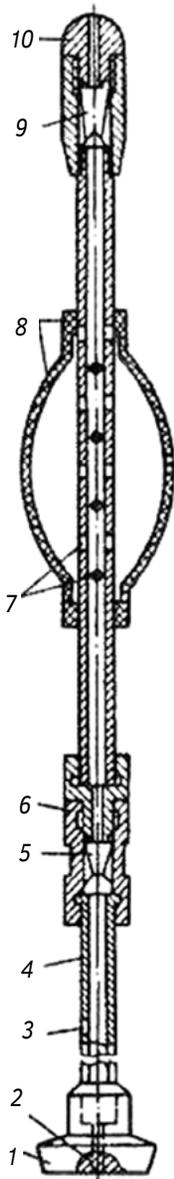


Рис. 11.12. Устройство стеклодувной трубки:

1 — наборная головка; 2 — выходящее сопло; 3 — предохранительное отверстие; 4 — стальная трубка; 5 — ниппель нижнего клапана; 6 — нижний клапан; 7 — отверстие для воздуха; 8 — резиновый баллон; 9 — ниппель верхнего клапана; 10 — верхний клапан

Банка из бесцветного полубелого или обесцвеченного стекла для компотов, консервов, соков и сыпучих продуктов и т. п., емкостью от 200 до 5000 мл, с горлышком под крышку твист-офф, с бюгельным замком или пробку.

Основным инструментом производства тарного стекла уже 2000 лет является стеклодувная трубка, изобретенная на Ближнем Востоке в эпоху Римской империи. Стеклодувная трубка состоит из стальной трубы, из бесшовной тянутой стали с толщиной стенок 4–5 мм, наружным диаметром от 8 до 25 мм и длиной от 90 до 150 см. Конец трубки, служащий для вдувания воздуха, спилен на конус и на него надет мундштук, который берет в рот выдувальщик. На противоположном конце расположен наборный наконечник, головка или набель, служащие для взятия порции горячей стекломассы. Клапаны и отверстия внутри трубки предназначены для увеличения мощности дутья.

Важным вспомогательным инструментом при работе с выдувной трубкой является понтия. Кроме того, в ассортимент необходимых приспособлений стеклодувного участка входят: стальные ножницы и щипцы для удаления лишней стекломассы и придания необходимой формы горлу, ручкам и ножкам изделий; долоки и гладилки — деревянные приспособления для выравнивания стенок баночки, разглаживания поверхности изделия (рис. 11.13). Формы для выдувания делали из твердых пород дерева и хранили в специальных емкостях для замачивания форм и охлаждения металлических инструментов.

Процесс изготовления изделий ручным способом включает следующие основные стадии (схемы а и б на рис. 11.14):

- набор стекломассы из печи на стеклодувную трубку и изготовление баночки-заготовки, масса которой равна массе будущего изделия (набор стекломассы на трубку может быть многократным) (схемы а, позиции 1, 4 и 5);
- придание баночке шарообразной, продолговатой или сплюснутой формы, в зависимости от формы изделия (схема а, позиции 2 и 3);
- изготовление пульки — продувание баночки при непрерывном вращении трубки таким образом, чтобы обеспечить равномерную толщину стенок изделия (схема б, позиция 1);
- окончательное выдувание пульки с использованием формы или без нее и перенесение выдутого изделия с выдувной трубки на понтию (схема б, позиции 2 и 3);
- отрезка колпачка и оформление горла изделия (схема б, позиции 4, 5, 6 и 7);
- прикрепление ручек кувшинов или графинов или ножек рюмок, бокалов, конфетниц и т. п. (схемы в и г);
- отделение от понтии и помещение готового изделия в печь отжига.

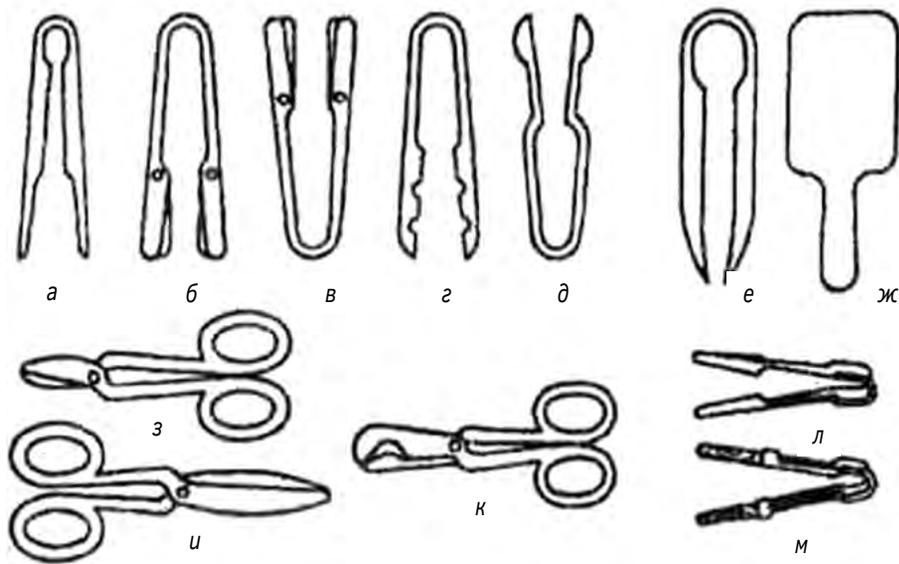


Рис. 11.13. Инструменты для ручного формования:

а–е — щипцы для отделки ручек, ножек, горла и декорирования изделий; ж — гладилка для выравнивания стенок изделий; з–к — ножницы для отрезки горячей стекломассы; л, м — сошки для фигурной отделки

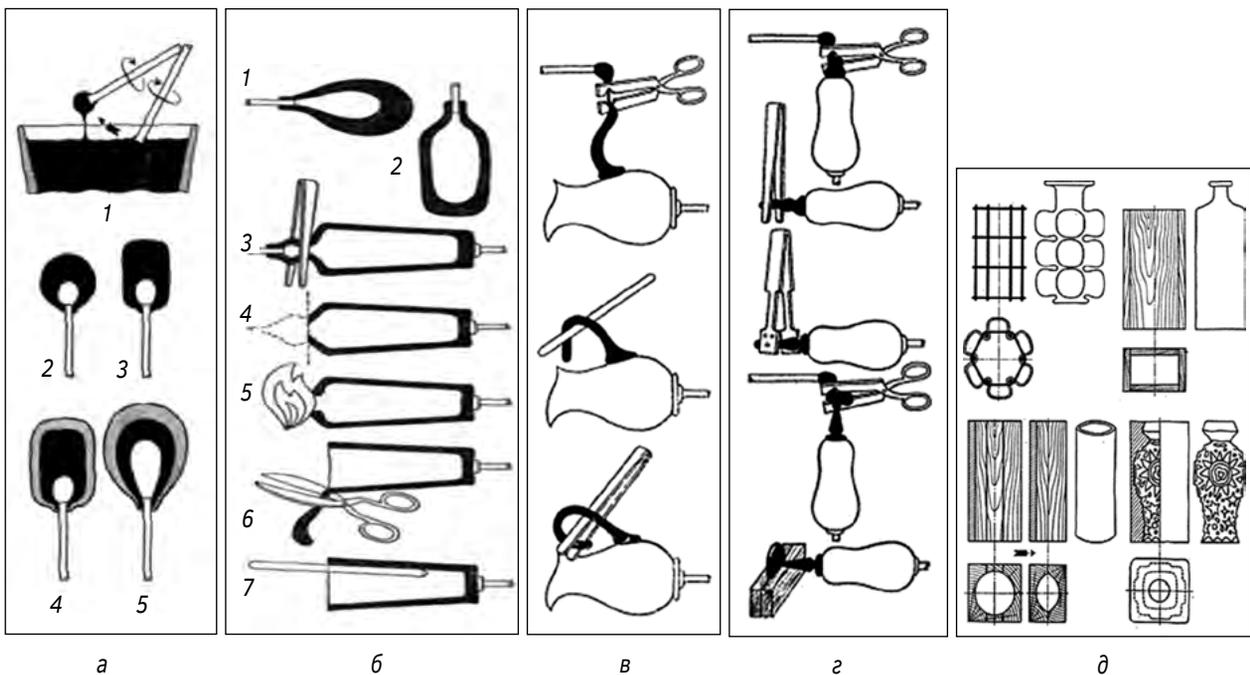


Рис. 11.14. Стадии свободного выдувание изделий (а, б, в, г) и формы и виды тиходутых изделий (д)

При свободном выдувании для придания вытянутой, сплюснутой или шарообразной формы изделиям мастер меняет положение стеклодувной трубки: вниз, вверх или горизонтально. Все выдувные изделия, кроме тиходутых, формируют при непрерывном вращении стеклодувной трубки.

Тиходутые изделия выдувают без вращения в одноразовые формы, изготовленные из металлической проволоки, дерева, гипса, керамики и т. п. Изделия, изготовленные тихим дутьем, отличаются большой толщиной стенок, неправильной формой, сложным рельефом поверхности (рис. 11.14 д).

Примерно в это же время появился способ изготовления стекол для оконных проемов, который называют лунным. Если мастер выдувал заготовку из прозрачного стекла, поднимая стеклодувную трубку вверх, он получал сплюснутый шар, к плоскости которого прикрепляли понтию и отделяли стеклодувную трубку. Затем разогревали края стекла и раскручивали заготовку до тех пор, пока не получали плоский диск, края которого были намного тоньше, чем середина. После отделения понтии, отжига и обработки места ее прикрепления получали оконное стекло, через которое проходил свет.

Многостадийность процессов ручного выдувания требует участия нескольких человек в создании каждого изделия. Сегодня специализации мастеров-выдувальщиков выглядят следующим образом (см. табл. 11.4), при этом один человек может выполнять как отдельные операции, так и несколько. В художественных мастерских, как правило, мастер владеет всеми приемами, необходимыми для изготовления всех видов выдувных изделий.

Таблица 11.4. Состав бригады и технологические операции, выполняемые при ручном выдувании изделий

Член бригады	Технологическая операция
Баночник	Набор стекломассы на стеклодувную трубку и оформление баночки
Поддувальщик	Подготовка баночки к выдуванию, при необходимости второй набор стекломассы, первичное продувание баночки
Выдувальщик	Выдувание изделие — свободное или в форму
Отдельщик	Снятие выдутого изделия на понтию, оформление горла ручек и ножек изделий
Наборщик	Набор новых порций стекломассы и изготовление ручек, ножек, доньшек изделий, деталей для налепа и других способов формования
Леечник	Набор стекломассы и изготовление «леек» или воронок из цветного стекла для декорирования изделий полным или частичным накладом
Грельщик	Подогрев изделий для оформления горла, прикрепления ручек и ножек, горячего декорирования и перенос готовых изделий в печь отжига

Если обобщить все технологические завоевания римского периода, то получим следующую картину:

- стекло обрело статус прозрачного материала и превратилось из предмета роскоши в предмет обихода;
- получение обесцвеченных прозрачных стекол стало возможным из-за использования, в первую очередь, более чистых песков, с меньшим содержанием красящих оксидов;
- составы стекол разделились на содовые — происходящие из Египта, и поташные, характерные для стран северного и восточного Средиземноморья; содержание щелочных катионов в них снизилось до 20 мас. %;
- отработаны режимы получения прозрачных окрашенных в массу стекол, в том числе и розалинового, окрашенного частицами золота, и золотисто-зеленого, окрашенного солями урана;
- варка стекла снова стала одностадийной благодаря совершенствованию топочных частей печей, размещению их в закрытых помещениях и системам поддува воздуха, позволивших повысить и стабилизировать температуру пламени;
- основным способом формования изделий становится выдувание, однако остаются востребованными и литье, вытягивание и прессование;
- появляется стадия отжига изделий и устройства типа камерных печей для этой цели;
- из бесцветного и цветного стекла изготавливали следующие виды тонкостенных и толстостенных изделий: украшения, узкогорлую стеклянную тару, сортовую посуду (рюмки, бокалы, кувшины, чаши), мелкую стеклянную скульптуру.

Технология сортового стекла

Сортовым стеклом называют стеклянную посуду: стаканы, кувшины, масленки и изделия на ножке — рюмки. К сортовому стеклу также относят изготавливаемые по сходной технологии пепельницы, туалетные приборы, сувенирные изделия. Требования к качеству сортового стекла очень высоки, поэтому для варки сортового стекла применяют особо чистые сырьевые материалы и, в частности, песок, содержащий минимальное количество окислов железа. В состав сортового стекла механизированной выработки вводят 2–3% K_2O . Сырьевые материалы, содержащие этот окисел (поташ и др.), дороже натриевого сырья, однако введение в состав K_2O благоприятно сказывается на внешнем виде сортовых изделий, улучшая их блеск и прозрачность. Для получения изделий особо высокого качества применяют хрустальные стекла, содержащие окись свинца, повышающую коэффициент преломления и усиливающую блеск изделий.

В производстве сортовых изделий широко используют цветные стекла самых разнообразных оттенков. Для окраски стекол применяют окислы металлов, в том числе редкоземельных, а также золото, селен, селениды. Цветные стекла можно применять как для изготовления самих изделий, так и в качестве накладных. В последнем случае на изделие из бесцветного стекла накладывается внешний слой цветного накладного стекла.

Варка сортовых стекол производится в небольших ваннных и горшковых печах. В ваннных печах варят стекла для механизированной выработки, а также более простые составы стекол, вырабатываемых вручную. В тех случаях, когда варка стекла требует применения особо сложного режима, используют горшковые печи. Сортовое стекло вырабатывают вручную или механизированным способом. В настоящее время удалось механизировать выработку более простых изделий, однако значительную часть сортовых изделий изготавливают вручную. Это прежде всего сложные изделия, особенно из сортового стекла, а также изделия, выпускаемые небольшими партиями.

Ручная выработка изделий обычно осуществляется бригадами в составе 4–6 человек. При выработке сортовых изделий основным инструментом является железная стеклодувная трубка длиной 1–1,5 м, снабженная деревянной ручкой. Рабочий опускает трубку в стекломассу и, вращая ее, набирает на трубку порцию стекломассы — баночку. Затем, обкатывая баночку на металлической плите, придает ей необходимую форму. При производстве изделий из накладного стекла на полученную баночку набирается из другого горшка слой цветного стекла. После окончания набора рабочий, раскачивая трубку, поднимая и опуская ее, придает баночке форму, по возможности близкую к готовому изделию. Окончательное выдувание изделия производится в металлической форме. Цилиндрические или раскрывающиеся кверху изделия выдуваются в цельных (нераскрывных) формах. Изделия другой формы изготавливают в раскрывных формах. При выдувании изделий их вращают для повышения качества поверхности.

В процесс ручной выработки изделий входят также операции окончательной отделки, осуществляемые после формования. Окончательная отделка заключается в формовании носиков кувшинов, придании частям изделия плоской формы, прикреплении ручек к кувшинам, а также ножек к рюмкам.

В процессе выработки сортовых изделий ручным способом осуществляется также их украшение, выполняемое различными способами. Один из способов украшения изделий — обвивание изделий стеклянными нитями другого цвета. Так называемое мраморное стекло изготавливают, закатывая в баночку из глушеного стекла кусочки цветного стекла. Стекло «мороз», покрытое заплавленными трещинами, получают, попеременно опуская баночку в холодную воду и вновь разогревая ее в печи.

Прессованием изготавливают относительно толстостенные сортовые изделия сравнительно простой формы: салатники, граненые стаканы, пепельницы и др. Нанося на внутреннюю поверхность форм различные рельефные узоры, получают соответствующие узоры и на

изделии. Прессование изделий осуществляется на ручных полуавтоматических и автоматических прессах.

Ручным прессованием изготавливают более сложные и крупные изделия. Набранную вручную каплю стекломассы помещают в форму пресса, после чего пуансон пресса, усилие которого обеспечивается пружинным или эксцентриковым механизмом, воздействует на каплю, придавая изделию необходимую форму.

На автоматических прессах изготавливают сортовые изделия сравнительно небольшой величины. При формовании на автоматических прессах капля стекломассы подается в одну из форм, установленных на рабочем столе пресса. После подачи капли стол пресса поворачивается, и форма с каплей поступает под пуансон. После остановки стола пуансон пневматическим цилиндром опускается в форму, прессуя изделие.

Машинным выдуванием изготавливают тонкостенные стаканы и некоторые другие изделия.

Питание автомата стекломассой осуществляется вакуумным питателем, снабженным четырьмя наборными головками, являющимися также черновыми формами автомата. Питатель, установленный на рабочем столе машины, двигаясь по наклонным салазкам, опускает наборные головки в стекломассу, после чего к наборным головкам подключается вакуум, под действием которого осуществляется засасывание в наборные головки каплей необходимой массы. После возвращения питателя в исходную позицию наборные головки закрывают снизу поддонами и осуществляется предварительное прессование баночек. Баночки передаются на выдувные трубки и удлиняются под действием собственной массы, после чего происходит окончательное выдувание изделий в раскрывных формах.

При производстве тонкостенных сортовых изделий на высокопроизводительных конвейерных машинах с ленточным питанием, применяемых за рубежом, сначала формируется прокатом между двумя валками лента стекломассы. Верхний валок имеет углубления, что обеспечивает формование ленты с утолщениями. При дальнейшем движении лента поступает на горизонтальный конвейер, снабженный отверстиями, над которыми располагаются утолщения ленты. Провисая в отверстия, утолщения ленты образуют баночки. Над лентой синхронно с первым конвейером движется второй, несущий выдувные головки, при помощи которых осуществляется сначала предварительное раздувание баночки, а затем окончательное выдувание изделий в раскрывных формах, установленных на третьем горизонтальном конвейере, расположенном под первым. После раскрывания форм изделия молоточком откалываются от ленты и падают на ленточный конвейер, на котором поступают в отжигательную печь. Остатки ленты возвращаются в стекловаренную печь на переплавку. Производительность конвейерных машин достигает 170 тыс. изделий в сутки.

В последние годы удалось осуществить механизацию производства изделий на ножке. По одному способу изделия прессуют на автоматическом прессе, а полую часть формируют на вакуумном автомате, затем обе части сваривают. По другому способу изделия формируют вакуумно-выдувным способом с последующей раскаткой ножки.

После формования изделий осуществляется их отжиг, а затем операции отколки и оплавки изделий, полученных выдуванием (откалывают колпачок, соединяющий изделие с выдувной трубкой). Удаляют колпачок либо механической отрезкой, либо огневой отколкой. При огневой отколке на изделие на границе с колпачком наносят линию надреза, которую затем нагревают горелкой, что вызывает отколку колпачка. После отколки край изделия обрабатывают абразивным диском и подвергают оплавке. Прессованные изделия обычно оплавливают полностью для получения гладкой и блестящей поверхности.

Заключительной стадией обработки сортовых изделий является декоративная обработка, к которой относятся абразивная обработка, кислотное травление и декорирование изделий. Изделия механической выработки обычно подвергают только простейшему виду абразивной обработки — валовой шлифовке, при которой на поверхность изделия абразивными дисками наносят простейшие узоры, состоящие из овалов, кругов, полосок. При

изготовлении изделий более высокого качества применяют номерную шлифовку для получения как неглубоких, так и глубоких узоров. Глубокие узоры называют алмазной гранью.

Наиболее сложный вид абразивной обработки, применяемый для получения высокохудожественных изделий, — художественная гравировка, выполняемая вращающимися медными колесиками при помощи наждачной пасты, используемой в качестве абразива. В результате художественной гравировки на стекло наносят наиболее сложные и тонкие рисунки. Участки изделий, подвергнутые абразивной обработке, имеют матовую поверхность. Для придания блеска их полируют деревянными дисками или щетками или подвергают кислотной полировке — обработке смесью плавиковой и серной кислот.

Кислотная обработка (травление) может применяться для получения на поверхности сортовых изделий тонких рисунков различной глубины. При травлении изделий на поверхность стекла наносят защитный слой из мастики или воска. Затем вручную или при помощи пантографа прорезают в защитном слое рисунок. После этого изделия погружают в ванну с кислотой, где незащищенные мастикой участки поверхности травятся с образованием рисунка. В зависимости от состава травящей жидкости и продолжительности травления рисунок может быть блестящим или матовым и иметь различную глубину.

При декорировании рисунки на изделия наносят с помощью керамических красок. Для нанесения рисунка применяют, в частности, трафарет, в котором прорезан рисунок. Трафаретом закрывают поверхность изделия, а затем незакрытую поверхность изделия покрывают при помощи кисти или пульверизатора краской. По другому способу для получения рисунка используют шелковую сетку. На такую сетку наносят фотоэмульсию и освещают ее, пропуская свет через диапозитив рисунка. Обработанная таким образом сетка пропускает краску только в местах, соответствующих темным участкам диапозитива. Сетка прижимается к изделию, покрывается краской и прокатывается резиновым валиком, продавливающим краску на поверхность изделия. Наиболее массовым способом нанесения рисунков является декалькомания (переводные картинки). После нанесения рисунка изделия подаются в туннельную печь, где краски обжигаются.

Классификация и основные способы декорирования стекла

Способы декорирования стеклянных изделий нарабатывались веками, и до сих пор не всегда можно точно указать автора того или иного приема. Существующая сегодня классификация основана на положении способа в общей технологической цепочке изготовления изделия, а именно до или после стадии отжига используют тот или иной прием.

Способы декорирования изделий принято подразделять на горячие и холодные. Горячее декорирование осуществляют в интервале температур формования в процессе изготовления изделия и после него обязательна стадия отжига, тогда как холодное декорирование проводят на хорошо отожженных готовых изделиях.

К методам горячего декорирования относят:

- методы соединения в одном изделии нескольких стекол (все виды наклада; декорирование венецианской нитью и миллефиори);
- методы декорирования стекла с не стеклянными элементами (воздушными пузырями, трещинами, гипсовыми, керамическими, металлическими и др. вставками);
- методы нанесения декоративных покрытий (люстровые и иризирующие покрытия, обжиговые краски и деколи).

Способы холодной обработки разделяются на:

- механическую (гранение, резьба, гравирование, абразиво-струйная обработка);
- химическую (матирование и полирование);
- ультразвуковую и лазерную;
- нанесение лаковых и пленочных покрытий.

Практически все перечисленные способы горячего декорирования были разработаны в эпоху Ренессанса мастерами Венецианской республики. Жесткие законы удерживали мастеров-стеклоделов на острове Мурано. И они, унаследовавшие мастерство от предшественников — египтян, греков, римлян и византийцев, довели его до немыслимого совершенства.

Все методы, в которых требуется соединить несколько видов материалов, требуют от мастера знания их термических характеристик и, прежде всего, величин коэффициентов термического расширения. Самым простым и доступным сравнительным методом, которым пользовались старые мастера, является метод соединения двух нитей, которые накладывают одну на другую в горячем состоянии и при охлаждении общая нить выгибается в сторону материала с большим коэффициентом расширения. Растрескивание будет свидетельством невозможности совмещения таких стекол.

Существует несколько способов наложения одного стекла на другое: полный налад, разграниченный налад, акварельное пятно, стеклянная крошка, стеклянная нить и налел. Полный налад, в свою очередь, подразделяют на внутренний и наружный. Толщина накладного стекла не превышает 1 мм, тогда как толщина стенки изделия, на которую его наносят, всегда больше 2 мм. Изделие из бесцветного стекла с полным цветным наладом выглядит как изделие из стекла, окрашенного в массу.

При изготовлении изделия с полным **внутренним наладом** на выдувную трубку делается набор цветной стекломассы. Затем на изготовленную баночку делается второй и, если нужно, третий набор бесцветной стекломассы и только после этого происходит формирование изделия из нескольких равномерно распределенных слоев стекла. Для полного **наружного налада** первым делается набор бесцветного стекла и на подготовленную баночку — цветного. Вместо набора горячего стекла для нанесения цветного слоя можно использовать заготовки — воронки (лейки) (рис. 11.15 а) или цапфы (рис. 11.15 б).

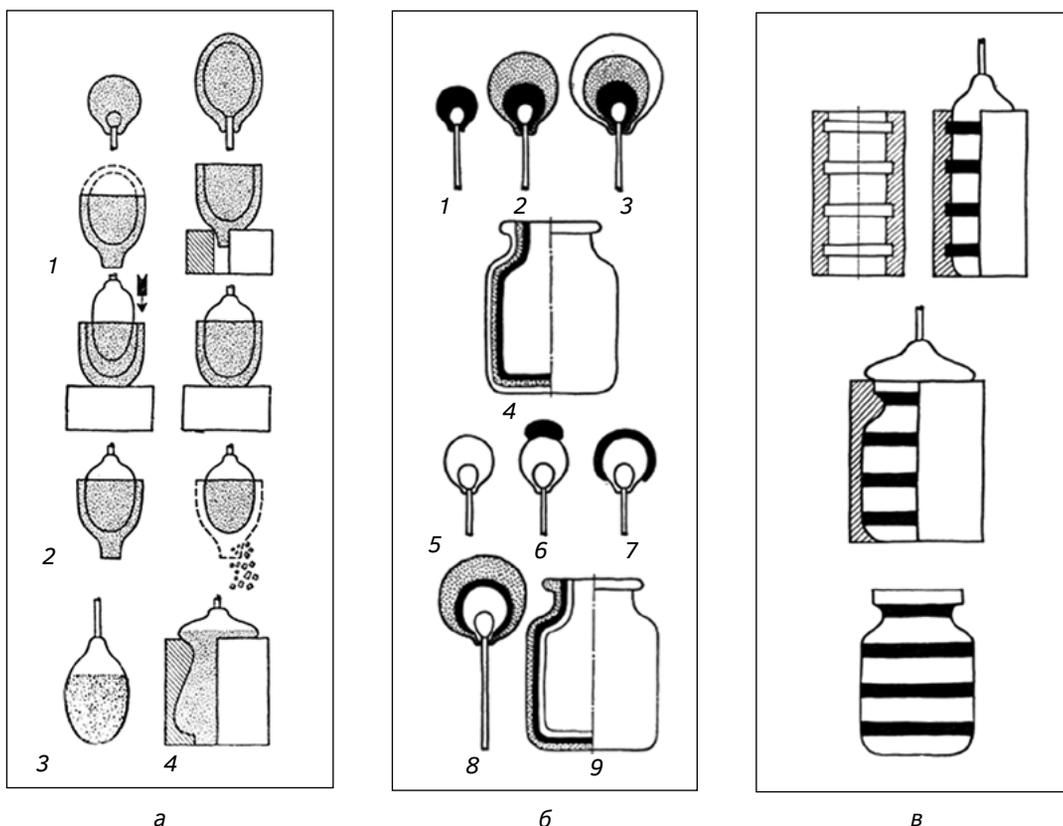


Рис. 11.15. Ручное формование, полный наружный налад (а), полный внутренний налад (б), разграниченный налад (в)

Воронка — это заготовка из цветного стекла в виде воронки, диаметр которой меньше диаметра выдуваемого изделия, а толщина стенок около 2 мм, которую используют для получения полного наружного наклада (рис. 11.15 а, позиция 1). Цапфа — это стержень из цветного стекла диаметром от 2 до 50 мм и длиной до 1000 мм, с помощью которого выполняют изделия как с внутренним, так и наружным накладом (рис. 11.15 б, позиции 5–9).

Для получения **разграниченного наклада** кусочки цветного стекла помещают в пазы разогретой формы для изготовления заготовки для выдувания. Горячую пульку помещают в раскрывную форму и выдувают до полного слияния цветных полосок стекла с ее поверхностью. Затем заготовку подогревают в печи, опускают в форму и окончательно выдувают изделие, в котором чередуются цветные и бесцветные полосы (рис. 11.15 в).

Наклад в виде **акварельного пятна** — способ получения на поверхности изделия цветных областей, толщина стекла у которых составляет доли миллиметра и переход от одного цвета к другому не имеет четкой границы, как на рисунке акварелью. Для получения акварельного пятна тонкостенный шар из цветного стекла прислоняют к заготовке для выдувания, а оставшееся стекло просто откалывают. Количество таких пятен зависит от наносимого рисунка. Затем, как и в случае разграниченного наклада, заготовку разогревают и окончательно выдувают.

Декорирование **цветной стеклянной крошкой** — один из наиболее простых и эффектных способов украшения изделий (рис. 11.16 а). Навивание на поверхность изделия цветной стеклянной нити и расчесывание ее специальным гребнем применяли еще египтяне во II–III тысячелетии до н. э. В настоящее время кроме нити на поверхности баночки или выдутого изделия закрепляют бисер, нанизанный на стекловолокно, стеклоткань, расшитую бисером и стеклярусом, и т. п. Украшение поверхности декоративными элементами из стекла (рис. 11.16 б) осуществляют, совмещая декорирование с формованием или прикрепляя на горячее выдутое изделие готовые элементы из керамики, гипса, слюды, металлической фольги.

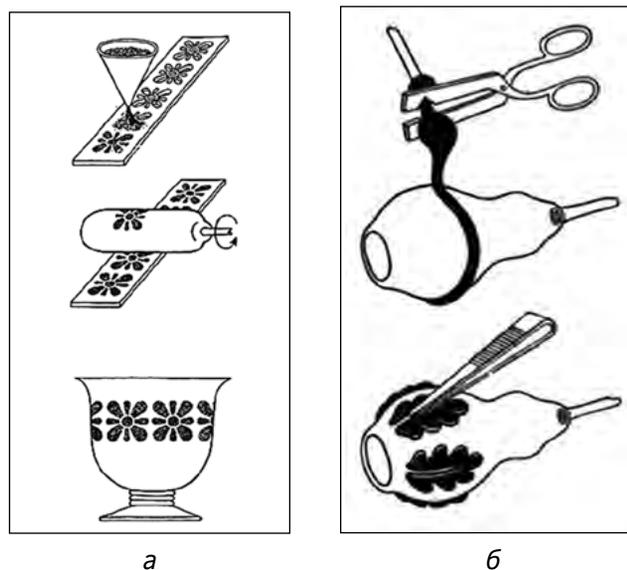


Рис. 11.16. Ручное формование, декорирование стеклянной крошкой (а), декорирование наклепом (б)

Воздушные пузыри между слоями стекла получают с помощью соединений, разлагающихся при температурах 700–900°C (сода, борная кислота, тетраборат натрия, карбонат кальция), которые наносятся на поверхность баночки, полученной из первого набора стекломассы. Интенсивное выделение газовой фазы при повторном наборе стекломассы позволяет получить изделие, в объеме которого равномерно распределены газовые пузыри.

Кракле — способ декорирования путем создания на поверхности или между слоями стекла трещиноватого слоя, — уникален и возможен только в технологии стекла. Горячую пульку прокатывают по мокрым опилкам или опускают в сосуд с водой, с тем чтобы на поверхности образовались трещины, а затем берут еще один набор стекломассы или заготовку, позволяющие сохранить целостность изделия, и окончательно выдувают.

Венецианская нить и миллефиори не имеют аналогов по сложности изготовления и достигаемому декоративному эффекту. Для изготовления **венецианской нити** на выдувную трубку делается набор стекла и оформляется продолговатая баночка (рис. 11.17 а). На оформленную баночку набирается второе стекло, затем к ним прикрепляется понтия и заготовка растягивается до получения двуцветного стержня диаметром 5–6 мм. Для изготовления многоцветной нити на продолговатую баночку, выполненную из первого набора стекла, прикрепляют один или несколько стержней из цветного стекла, которые закрывают еще одним набором горячего бесцветного стекла. Если растягивать такую заготовку с вращением, то получается стержень с одной или несколькими цветными спиралями.

Для получения изделия, декорированного венецианской нитью, стержни помещают в подогретую форму, установленную на глиняную подложку, посыпанную песком, и опускают в нее баночку, подготовленную для формования изделия. Стержни прилипают к горячему стеклу, и после этого начинается выдувание изделия (рис. 11.17 б). Для получения доньшка, декорированного нитью, часть стекломассы пережимают, закручивают и отрезают, затем прикрепляют к доньшку понтию и продолжают выдувать изделие с вращением трубки и понтии в разные стороны таким образом, чтобы нити закрутились спиралью. Для получения сетчатого рисунка спиральную заготовку на стеклодувной трубке помещают в заранее подготовленную заготовку, у которой спирали закручены в противоположную сторону. Окончательное выдувание такой сложной заготовки позволяет получить знаменитое филигранное стекло (рис. 11.17 в, г).

Для декорирования изделий в технике **миллефиори** изготавливают диски диаметром 3–6 мм и толщиной до 3 мм с concentрическими полихромными рисунками. Схема изготовления диска и один из вариантов украшения ими изделий из бесцветного стекла приведены на рис. 11.17 д.

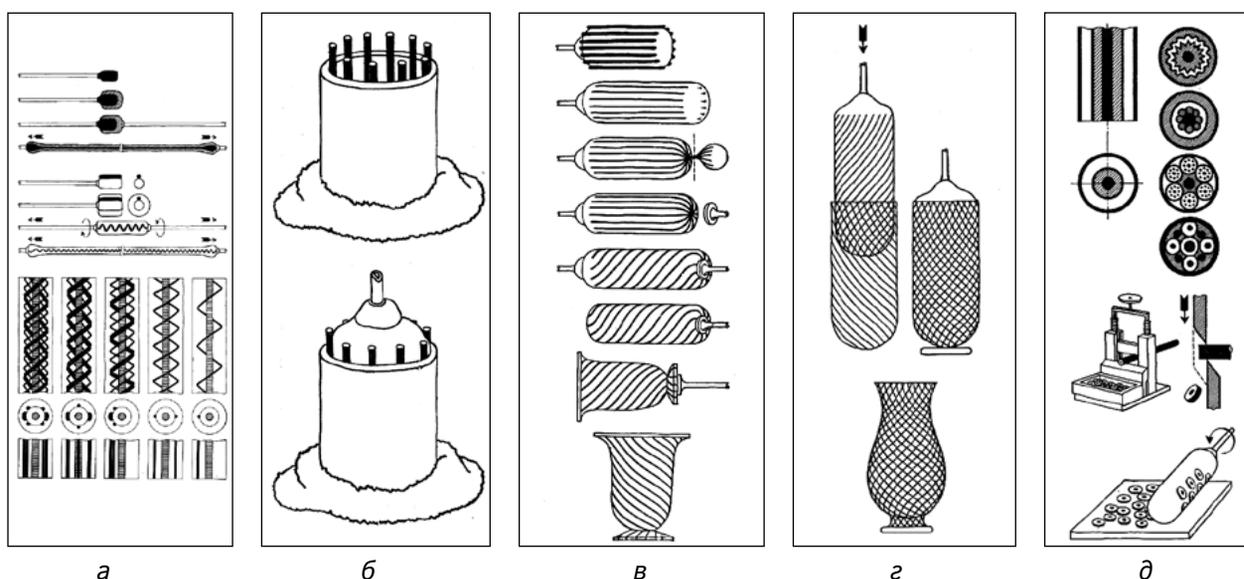


Рис. 11.17. Схемы: а) изготовление венецианской нити; б) закрепление венецианской нити на поверхности пульки; в) изготовление однослойного изделия с однонаправленным кручением нити; г) изготовление «сетчатого изделия»; д) изготовление дисков миллефиори и декорирование с их помощью изделия

Декоративные покрытия относят к горячим способам декорирования, поскольку их закрепление на поверхности изделия происходит при температурах выше температуры стеклования, но ниже температуры деформации. А в температурно-временной режим закрепления покрытия входит стадия отжига изделия. **Люстровые краски** (резинаты благородных металлов) наносят кистями, шпателями или пульверизацией (рис. 11.18). После обжига образуется рисунок из сверкающего металлического слоя золота или серебра. **Иризация** — окуривание поверхности изделия в печи при температурах 550–700°С легковозгоняющимися солями элементов переменной степени окисления. Радужные разводы образуются на поверхности изделия благодаря осаждению на ней оксидно-металлической пленки олова, висмута, титана, бария, стронция. При увеличении толщины получаемого покрытия появляется перламутровый блеск.

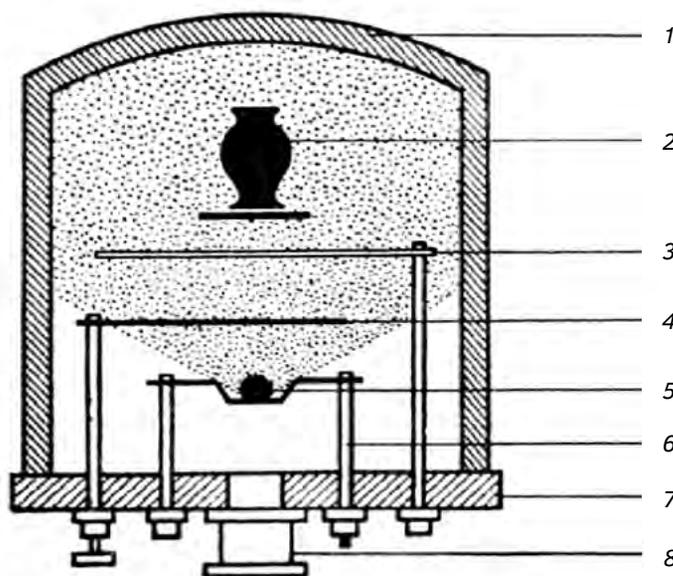


Рис. 11.18. Нанесение декоративного иризирующего покрытия: 1 — печь; 2 — обрабатываемое изделие; 3 и 4 — нагреватели; 5 — сосуд с иризирующим составом; 6 — держатель; 7 — под печи; 8 — основание

Обжиговые краски по стеклу на основе легкоплавких свинцовосиликатных, свинцово-боратных и силикоборатных стекол растекаются на поверхности изделий при температурах 550–650°С. Их наносят с использованием трафаретов, пульверизации или художественной ручной росписи. С помощью обжиговых красок изготавливают готовые картинки — деколи на выгорающем носителе (например, бумажном или полимерном), которые прочно прикрепляются к поверхности готового изделия в результате выгорания носителя на стадии обжига. Еще один способ нанесения обжиговых красок — последовательное нанесение декоративного узора с помощью сеток-масок — называется шелкография. Рисунки, нанесенные этим способом, отличает тонкость линий и широкая гамма используемых красителей.

Завершая обзор декоративных приемов, появившихся в эпоху Ренессанса, следует отметить, что все они успешно преодолели последующий многовековой путь, распространились по всем странам и континентам, в которых есть производство стекла. В настоящее время они широко используются в массовом производстве посуды из сортового и хрустального стекла, для декорирования узкогорлой стеклянной тары, изготовления стемалита — листового стекла с цветным покрытием, и, безусловно, уникальных художественных изделий ручной работы.

СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ

В процессе производства листового стекла в целом соблюдаются следующие этапы:

- обработка и хранение сырьевых материалов;
- приготовление шихты (смеси с определенным соотношением сырьевых материалов);
- высокотемпературная варка шихты и получение расплавленной стекломассы;
- формование изделий;
- отжиг изделий.

Основными сырьевыми материалами для стекольного производства являются:

- кварцевый песок — источник оксида кремния (SiO_2) — основного компонента в составе стекла;
- кальцинированная сода (карбонат натрия Na_2CO_3) — для введения оксида натрия (Na_2O), который снижает температуру варки;
- поташ (карбонат калия K_2CO_3) — для введения оксида калия (K_2O), увеличивающего «длину» (вязкостную характеристику при формовании) стекла;
- мел, известняк, мрамор (карбонаты кальция CaCO_3) — источники оксида кальция (CaO);
- доломит (двойной карбонат кальция и магния $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) — введением оксидов кальция (CaO) и магния (MgO) можно регулировать температуру плавления и вязкость; они улучшают механические и химические свойства;
- глинозем (оксид алюминия Al_2O_3) — добавляют, чтобы улучшить стойкость к химическому воздействию.

Производство стекловой массы представляет собой многоэтапный комплексный процесс, на первой стадии которого приготовленная смесь нагревается в стеклоплавильной печи до 400°C ; из нее испаряется содержащаяся влага и происходит температурное разложение солей. Затем температура повышается до $800\text{--}900^\circ\text{C}$ для завершения химического взаимодействия между всеми исходными компонентами. Далее температура повышается до 1100°C , и в итоге образуется прозрачная неоднородная стеклянная масса с большим количеством пузырьков газа, которая разогревается до 1500°C . При данной температуре газовые пузырьки либо поднимаются к поверхности расплава и лопаются, либо растворяются в жидком стекле.

Эта процедура занимает до 90% времени, отведенного на весь процесс. В ходе варки также выполняются процедуры осветления и гомогенизации, после чего температура массы медленно и плавно понижается до уровня $700\text{--}1000^\circ\text{C}$. В этом диапазоне стекло приобретает нужную вязкость и готово для формирования листов.

Как говорилось выше, производство стекла имеет в своей основе две основных технологии — флоат и Фурко.

Общее сравнение методов производства листового стекла представлено на рис. 11.20.

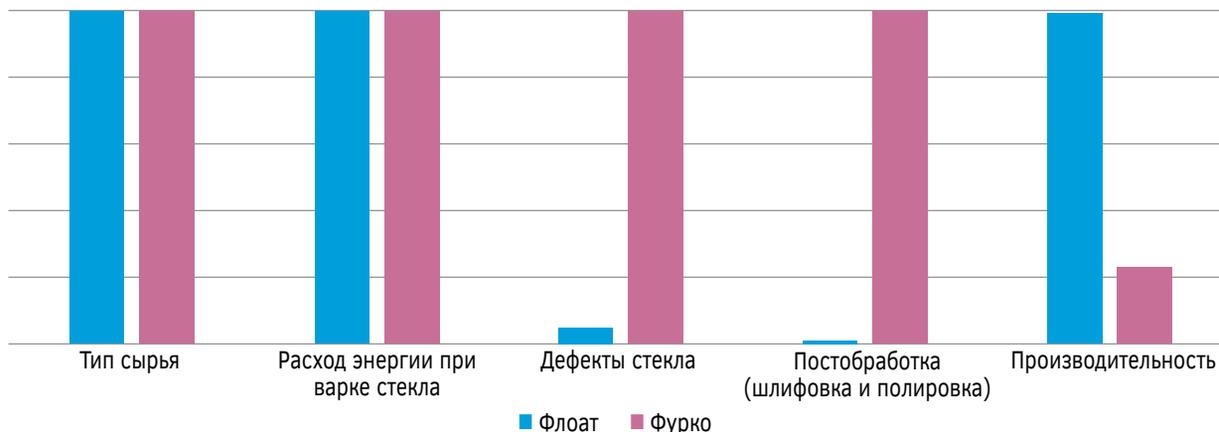


Рис. 11.20. Основные параметры производства листового стекла по методу Фурко и с помощью флоат-процесса

Сравнение параметров технологий Фурко и флоат-процесса позволяет сделать вывод о том, что последняя обладает рядом важных достоинств:

- обеспечение стабильной толщины листов;
- практически полное отсутствие дефектов на поверхности стекла;
- возможность декоративного оформления;
- отсутствие оптических искажений;
- нет необходимости в дополнительной шлифовке и полировке.

РОЛЬ СТЕКОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В ГЛОБАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКЕ

Современные рыночные условия, учитывающие стоимость производства и логистику, часто делают невыгодным использование плоского и тарного стекла при перевозке на большие расстояния. Более 90% продукции стекольной промышленности используется в смежных отраслях; таким образом, производство стекла существенно зависит от состояния строительной отрасли, автомобилестроения и пищевой промышленности. Тем не менее есть также секторы меньшего объема, которые производят техническую или потребительскую продукцию.

Производство листового и тарного стекла большей частью автоматизировано.

До финансового кризиса 2008 г. глобальный ежегодный рост спроса на листовое стекло составлял 5%, что было обусловлено растущим спросом в строительстве и автомобильной промышленности. Тем не менее этот рост остановился, так как мировой спрос упал в 2008 г.; в 2009 г. он сократился на 3,6%. Степень снижения была наиболее серьезной в Северной Америке и Европе, где падение спроса сопровождалось резким снижением загрузки производственных мощностей. Спрос на листовое стекло упал в ЕС примерно на 20% с 2007 по 2010 г. Загрузка производственных мощностей, которая до наступления рецессии приблизилась к 100%, понизилась до 85% в 2011 и 2012 гг. Тем не менее к 2017 г. наметился отчетливый тренд роста производства листового стекла.

Значение Китая как рынка стекла быстро растет с начала 1990-х гг. В начале 1990-х гг. на долю Китая приходилось около одной пятой мирового спроса на стекло, но уже с 2009 г. Китай является крупнейшим производителем стекла и изделий из стекла (чуть более 50%). В Китае — наибольшее количество предприятий по производству стекла и самое большое количество линий по производству флоат-стекла в мире. Рынок рос более чем на 10% в год с 2000 по 2009 г., а к 2016 г. рынок начал расти со скоростью на 8,2% в год, достигнув 3,4 млрд м².

Стекольная промышленность сильно сконцентрирована; например, в производстве листового стекла на долю четырех компаний: группы компаний Nippon Sheet Glass (NSG), Asahi Glass Company (AGC), Saint-Gobain и группы компаний Guardian — в 2010 г. пришлось более 50% мирового объема производства.

Европейский Союз является одним из крупнейших в мире рынков стекла как с точки зрения производства, так и потребления. Европейская стекольная промышленность объединяет около 1000 компаний и составляет более четверти неметаллического минерального сектора. Стекольная промышленность в Европе, как и во всем мире, имеет высокую концентрацию: более 80% стекла производится менее чем дюжиной транснациональных корпораций, в каждой из которых работает более 1000 сотрудников. Другие компании — маленькие или средние, в основном производящие специализированные изделия из стекла.

Производство стекла является энергоемким; в Европе затраты на энергию составляют около 22% производственных затрат, а затраты на рабочую силу — около 16%. Производство стекла также является значительным источником выбросов парниковых газов (ПГ), особенно углекислого газа (CO₂). За последние несколько десятилетий европейская промышленность смогла сократить потребление энергии на единицу продукции, что в период между 1970 и 2000 гг. привело к впечатляющему сокращению на 55% энергопотребления для отрасли плоского стекла при одновременном удвоении производства.

ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ

Опыт предыдущих поколений и потребности современного мира позволяют предполагать, что спрос на изделия из стекла в обозримом будущем вряд ли снизится. С другой стороны, должно появиться на свет новое лицо стеклянных изделий. Каким оно будет, судить не нам, но пути его изменения можно предположить.

Существенных изменений в составе промышленных стекол вряд ли следует ожидать, во всяком случае в нынешних условиях эксплуатации основных видов изделий.

Рассмотрим возможные изменения в технологии по трем наиболее важным для организации производства направлениям:

- энергосбережение;
- ресурсосбережение;
- экологическая безопасность.

Энергосбережение и пути его реализации

Обсуждая проблему энергосбережения, следует понимать, что в обозримом будущем нет альтернативы природным источникам энергии — газу, нефти и каменному углю — в промышленном производстве. Следовательно, пока мы можем говорить лишь о снижении расхода природных ресурсов.

Наиболее затратная по потреблению энергии часть производственного цикла — это стекловарение. Среди стадий стеклообразования, составляющих процесс стекловарения, наиболее длительная и требующая высоких температур стадия стеклообразования та, на которой происходит растворение в расплаве зерен кварцевого песка.

Каким образом можно облегчить этот процесс и уменьшить энергозатраты:

- приготовить шихту, более подходящую к процессу стеклообразования (гранулирование, компактирование, механоактивация, силикатообразование в шихте);
- обеспечить оптимальное соотношение «шихта — стеклобой»;
- снизить потери летучих компонентов при загрузке шихты в печь;
- изменить график зависимости максимальной температуры от длины печи;
- использовать тонкослойную варку или осветление для повышения качества стекломассы;
- использовать наиболее эффективные огнеупоры и теплоизоляцию для повышения КПД стекловаренных печей и, в первую очередь, продления срока их кампаний, т. е. длительности работы без промежуточных и капитальных ремонтов.

Ресурсосбережение и пути его реализации

Основными природными ресурсами, которые используют в производстве стекла, являются:

- энергоносители;
- сырьевые материалы.

Главными расходными сырьевыми материалами (основными материалами для приготовления шихты) являются кварцевый песок, мел, известняк, доломит, полевые шпаты. Львиная доля расхода приходится на кварцевый песок, поскольку его массовое содержание в составе промышленных стекол не менее 70 мас. %.

Известно, что пригодность песков для стекловарения основана на содержании в них оксида железа и размера частиц. Современные требования к белизне большинства бесцветных промышленных стекол заставляют ужесточать требования по содержанию оксида железа

до значений менее 0,05 мас. %. Размеры частиц песка, оптимальные для промышленного стекловарения, составляют 0,8–1,2 мм, причем более важной является нижняя граница. Появление частиц песка с меньшими размерами приводит к увеличению количества пузырей и усложнению стадии осветления.

Понятно, что чистых природных песков не так много и доля их существенно уменьшилась за годы добычи. Поэтому выходом из ситуации может быть развитие обогатительной отрасли, направленной на использование в производстве стекла любых песков нужного размера после соответствующей очистки и кондиционирования. Для производства цветной стеклотары целесообразно использовать альтернативные пескам источники оксида кремния, такие как трепел и диатомит. Проблема размеров частиц в этих материалах может быть решена методами гранулирования и компактирования порошков.

Второй способ снизить потребление природных ресурсов для варки стекол — увеличить долю стеклобоя в составе шихты. По сути, увеличение доли стеклобоя в шихте до 50% позволяет снизить длительность процесса стеклообразования и приблизить энергозатраты на стекловарение к теоретическим. Задача, собственно, сводится к созданию вменяемой системы сбора, сортировки и подготовки возвратного боя у населения, поскольку собственный стеклобой предприятия используют в полной мере.

Кроме того, в качестве сырьевых источников можно использовать отходы промышленного производства (шлаки, золы и т. п.). В технологии стекла в России есть массив непробыванных в промышленном производстве наработок по использованию разного сырья для получения окрашенных в массу материалов и стекла и стеклокристаллических материалов с превосходными прочностными, декоративными и другими характеристиками.

Экологическая безопасность

Вопросы экологической безопасности стекольной промышленности связаны, прежде всего, с выделением в окружающую среду продуктов горения органических энергоносителей. И дело здесь не столько в составе отходящих газов, поскольку основу там составляют соединения углерода, сколько в их количестве, если учесть, что КПД современных печей-гигантов только-только подбирается к 30%. Доля вредных соединений растет, когда мы имеем дело с производством свинцового хрусталя и большинства оптических и специальных стекол, но масштабы их производства существенно меньше, как и вклад в экологическую обстановку региона.

Второй ахиллесовой пятой стекольного производства стали пылевидные отходы, связанные с подготовкой шихты в составных цехах и улетучиванием сырьевых материалов при загрузке шихты в печь.

Частично эта проблема решена следующими путями:

- превращением составных цехов, которые занимались полной подготовкой природного сырья — очисткой, помолом и рассевом, в дозировочно-смесительные отделения, в которых производится, в основном, их отвешивание и перемешивание;
- использование современного оборудования, в котором все линии транспортировки сырья являются закрытыми;
- транспортировка шихты в печь происходит под «шапкой» из слоя стеклобоя, что предотвращает пыление при транспортировке и снижает улетучивание в зоне загрузки.

Можно использовать также гранулированную или компактированную шихту, но эта практика пока неоднозначна в нынешнем ее исполнении.

И третья группа экологически опасных отходов — отходы механической обработки стекла. Механическая обработка — резка и обработка края листового стекла, отрезка колпачка у выдувных сортовых изделий и художественная обработка хрустальных. В состав отходов, кроме собственно стеклянной пыли, входят соединения, образовавшиеся при нейтрализации промывных вод после механической и химической полировки изделий, т. е. соли серной

и плавиковой кислот. Проблема их утилизации по-прежнему остается острой, хотя были попытки использования их как наполнителей в дорожном строительстве.

Таким образом, можно говорить о том, что производство стекла имеет достаточно «точек роста», которые могут преобразоваться в новые технологические регламенты более совершенных технологических схем производства будущего.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гуляян, Ю. А. Технология стекла и стеклоизделий / Ю. А. Гуляян. — Владимир : Транзит-Икс, 2003.
2. Гуляян, Ю. А. Физико-химические основы технологии стекла / Ю. А. Гуляян. — Владимир : Транзит-Икс, 2008.
3. Дзюзер, В. Я. Проектирование энергоэффективных стекловаренных печей / В. Я. Дзюзер, В. С. Швыдкий. — М. : Теплотехник, 2009.
4. ИТС 5–2015. Производство стекла. — М. : Бюро НДТ, 2015.
5. Макаров, Р. И. Управление качеством листового стекла (флоат-способ) / Р. И. Макаров, В. В. Тарбеев, Е. Р. Хорошева, Ю. М. Попов, В. Н. Чуплыгин. — М. : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2004.
6. Маневич, В. Е. Сырьевые материалы, шихта и стекловарение / В. Е. Маневич, К. Ю. Субботин, В. В. Ефременков. — М. : РИФ «Стройматериалы», 2008.
7. Мелконян, Р. Г. Аморфные горные породы и стекловарение / Р. Г. Мелконян. — М. : НИИ-Природа, 2002.
8. Панкова, Н. А. Стекольная шихта и практика ее приготовления / Н. А. Панкова, Н. Ю. Михайленко. — М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 1997.
9. Сергеев, Ю. П. Выполнение художественных изделий из стекла : учебник для худ. вузов и училищ / Ю. П. Сергеев. — М. : Высш. шк., 1984.
10. Технология стекла. Справочные материалы / под ред. П. Д. Саркисова, В. Е. Маневича, В. Ф. Солинова, К. Ю. Субботина. — М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2012.
11. Храмков, В. П. Материалы для производства и обработки стекла и стеклоизделий / В. П. Храмков, Е. А. Чугунов. — М. : Высш. шк., 1987.
12. Чехов, О. С. Вопросы экологии в стекольном производстве / О. С. Чехов, В. И. Назаров, В. Г. Калыгин. — М. : Легпромбытиздат, 1990.
13. Шапилова, М. В. Охрана окружающего воздуха в стекольной промышленности / М. В. Шапилова, И. Т. Тимофеева. — М. : Легпромбытиздат, 1992.
14. Шелби, Дж. Структура, свойства и технология стекла / Дж. Шелби ; пер. с англ. Е. Ф. Медведева. — М. : Мир, 2006.

ПРОИЗВОДСТВО ЦЕМЕНТА

Екатерина Николаевна Потапова

РХТУ им. Д. И. Менделеева, профессор, доктор технических наук

Мария Андреевна Волосатова

Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики»,
специалист отдела стандартизации, методологии и оценки НДТ

*Основная причина обвалов построек нашего города та,
что... камни укладываются без надлежащего вяжущего.*

Плиний¹. Естественная история. Кн. 36

ВВЕДЕНИЕ

Цементная отрасль наряду с металлургией, электроэнергетикой, химией и машиностроением определяет экономический потенциал и уровень промышленного развития страны. Динамично развивающийся строительно-инвестиционный комплекс России, основу которого составляет цементная промышленность, дает возможности расширения объемов производства, ассортимента выпускаемой продукции. Роль цемента в современном строительстве очень велика, его ничем невозможно равноценно заменить. Цемент и изготовляемые из него бетон и железобетон являются в настоящее время основными строительными материалами, которые используются в самых разнообразных областях строительства. Цемент в качестве вяжущего материала является одним из основных компонентов для большинства сухих строительных смесей. При этом цемент остается относительно простым, универсальным и дешевым веществом, для изготовления которого требуются широко распространенные материалы — известняк, мергель, глины, мел, гипс.

На 1 января 2019 г. в Российской Федерации насчитывалось 58 цементных заводов полного цикла и 7 помольных установок суммарной мощностью 102,8 млн т цемента в год (рис. 12.1). Несоответствие объемов производства цемента и имеющихся мощностей в нашей стране объясняется высоким процентом незадействованных мощностей по производству ввиду высокого процента изношенности основных фондов заводов — изготовителей цемента. Всего в эксплуатации находится 142 технологические линии производства цемента,

¹ Плиний Старший (Гай Плиний Секунд; 22–79 н. э.) — древнеримский писатель-эрудит. Наиболее известен как автор «Естественной истории» — крупнейшего энциклопедического сочинения Античности; другие его сочинения не дошли до наших дней. Несмотря на очевидные недостатки, авторитет «Естественной истории» Плиния Старшего был непререкаемым в течение последующих XII–XIV вв., и, пожалуй, ни одно из сочинений древности, за исключением Библии, не оказало такого влияния на представления людей поздней Античности, Средневековья и Возрождения. Хочется привести некоторые цитаты Плиния, часть из которых мы и сегодня широко используем: «Каждому свое нравится», «Наилучший наставник во всем — привычка», «Может ли мерить вещи тот, у кого нет мерки даже для себя?», «Нам отказано в долгой жизни; оставим труды, которые докажут, что мы жили!», «Нет худа без добра», «Ни дня без строчки», «Падает тот, кто бежит. Тот, кто ползет, тот не падает», «Стыдно признаться, но ведь из всех живых существ один лишь человек не знает, что для него полезно», «Как много дел считались невозможными, пока они не были осуществлены», «Можно быть уверенным лишь в том, что ни в чем нельзя быть уверенным», «Дом — это там, где твое сердце», «Истинная слава состоит в том, чтобы делать то, что достойно быть описанным, и писать то, что достойно быть прочитанным».

причем большинство линий введено в эксплуатацию в прошлом веке. Самая «старая» линия функционирует с 1932 г., 17 линий построено в 50-е гг., 45 линий введено в эксплуатацию в 60-е гг. XX в.

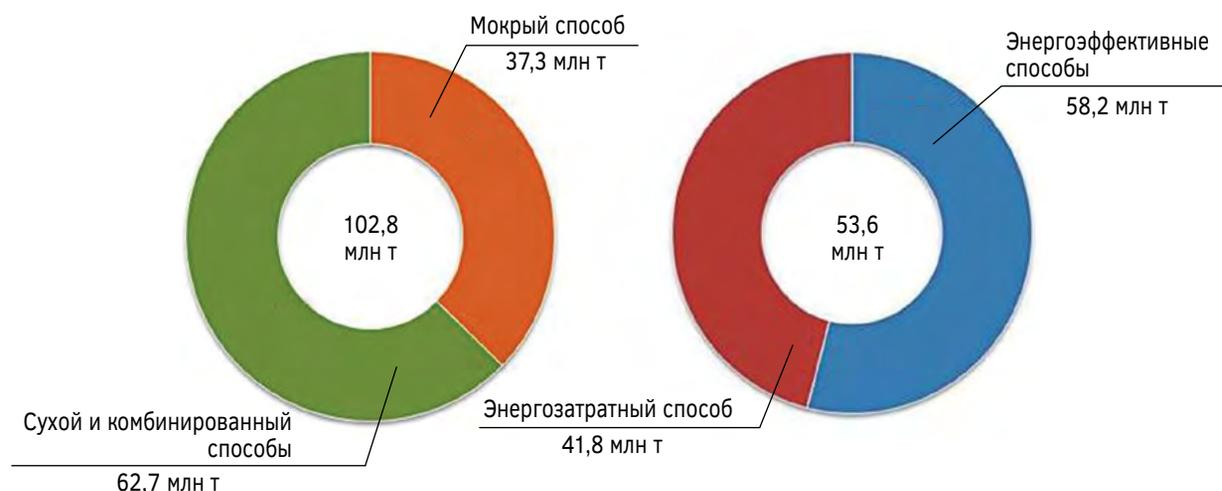


Рис. 12.1. Мощности предприятий по производству цемента и выпуск цемента в 2018 г. по данным аналитической компании СМ ПРО

Расположение предприятий по производству цемента на территории Российской Федерации довольно неравномерное. В европейской части России сосредоточено 73,5% от общего объема производства и 75% от объема потребления цемента. Всего цементные предприятия представлены в 41 субъекте Российской Федерации (рис. 12.2).

Размещение цементных предприятий на территории России определяется двумя факторами — потребительским и сырьевым. Первый выражается в концентрации производства близ крупных потребителей: крупнейших городов, значительных промышленных центров, т. е. тех мест, где ведется активное строительство. Можно сказать еще точнее: плотность цементных заводов по регионам России в целом подчинена плотности населения. Много крупных цементных заводов размещено в Центральной России, в районе горнопромышленного Кузбасса.

Однако без удобного и производительного природного сырья, даже имея под боком крупного и надежного потребителя, цементный завод не построишь. Именно поэтому все цементные заводы Центрального района размещены южнее границы зоны последнего оледенения. Цементных заводов нет ни под Тверью, ни у Ярославля, ни у Смоленска, хотя потребителей здесь, имея в виду еще и колоссальную Московскую агломерацию, хоть отбавляй. Во всем виноваты моренные суглинки, перекрывшие многометровым слоем месторождения цементного сырья. Поэтому в этих районах открытая разработка горных пород, необходимых для цементной промышленности, нерентабельна (слишком дороги вскрышные работы), а строить шахты глупо — нигде в мире цементное сырье не добывают подземным способом, ведь залежи известняка или мергеля легко можно найти в другом, более удобном месте.

В ряде случаев в качестве сырья для цементной промышленности используются отходы других отраслей индустрии. Именно таким образом в России сформировались центры производства цемента: в Новокузнецке, Магнитогорске, Новотроицке, Липецке — на базе отходов черной металлургии; в Пикалево, Ачинске, Красноярске, Норильске — с использованием отходов цветной металлургии; в Сланцах — на основе сланцевой золы.

В результате сложившейся структуры расположения предприятий и их мощностей удовлетворение спроса на цемент в отдельных регионах обеспечивается за счет межрегиональных поставок цемента и его импорта.

Что же касается форм собственности, то на сегодняшний день все предприятия цементной промышленности являются частными акционерными обществами, а некоторые — со значительной долей зарубежных акционеров. Ведущими фирмами — производителями цемента в России являются: ПАО «ЕВРОЦЕМЕНТ групп», ООО «Газметаллпроект», «Лафарж-Холсим Россия», ООО «ХайдельбергЦемент Рус», группа компаний «Дюккерхофф Цемент в России», АО «ХК «Сибирский цемент», АО «Себряковцемент», группа компаний «Востокцемент», ООО «ЮУГПК», ООО «Базэлцемент», ООО «Азия Цемент», АО «Искитимцемент». Абсолютным лидером по производству цемента в России является компания «Евроцемент». В 2018 г. она произвела 15,3 млн т цемента, заняв 28% российского рынка.

Основными потребителями цемента являются заводы железобетонных и асбестоцементных изделий и конструкций, на долю которых традиционно уходит до 75% производимого цемента, примерно 15% цемента используется при проведении строительно-монтажных работ, порядка 5% продается в розницу населению. В последние годы в структуре потребления цемента наблюдаются тенденции, связанные со снижением производства сборных железобетонных конструкций, увеличением объемов домостроения из монолитного бетона и железобетона, ростом объемов работ.

ИСТОРИЯ ЗАРОЖДЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЦЕМЕНТНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

С древнейших времен и поныне огромное значение в жизни человечества имеют материалы, которые служат для связывания между собой камней, кирпичей или отдельных конструктивных элементов жилых домов, инженерных и архитектурных сооружений, для штукатурки, отделки и гидроизоляции их. Из них же изготавливают искусственные строительные материалы и изделия. Наконец, их используют для производства строительных растворов и бетонов для возведения бетонных и железобетонных зданий и сооружений.

Сырьевой базой для производства неорганических вяжущих веществ являются горные породы и побочные продукты промышленности. Среди горных пород для этих целей используют сульфатные — гипс и ангидрит; карбонатные — известняк, мел, известковые туфы, ракушечник, мрамор, доломиты, доломитизированные известняки, магнезит; мергелистые — известковые мергели; алюмосиликатные — нефелины, глины, глинистые сланцы; высокоглиноземистое сырье — бокситы, корунды и др.; кремнеземистые горные породы — кварцевый песок, трассы, вулканический пепел (пуццолана), диатомит, трепел, опока.

Вяжущие материалы — основа строительных материалов — предназначены для изготовления бетонов и строительных растворов, скрепления отдельных элементов (деталей) сооружений, гидроизоляции и др.: «Повяжут песок — бетон получается, повяжут камни-валуны — плита, постамент или стена какая-нибудь выходит».

«Бетон — наилучший из материалов, изобретенных человечеством... История его — это героический эпос человеческой мысли и воли», — так восторженно говорит о бетоне известный итальянский инженер и архитектор Пьер Луиджи Нерви². Специалисты считают бетон материалом эпохи революционных преобразований в строительстве и архитектуре.

Трудно точно сказать, где и когда появился бетон, так как начало его зарождения уходит далеко в глубь веков. Очевидно лишь то, что он не возник таким, каким мы его знаем сегодня, а, как большинство строительных материалов, прошел длинный путь развития.

² Нерви Пьер Луиджи (Nervi; 1891–1979) — итальянский инженер и архитектор, изобретатель армоцемента (мелкозернистого бетона, армированного тканями или сварными сетками из мелкой проволоки); экспериментальное исследование строительных материалов и конструкций связывал с поисками новых средств художественной выразительности.

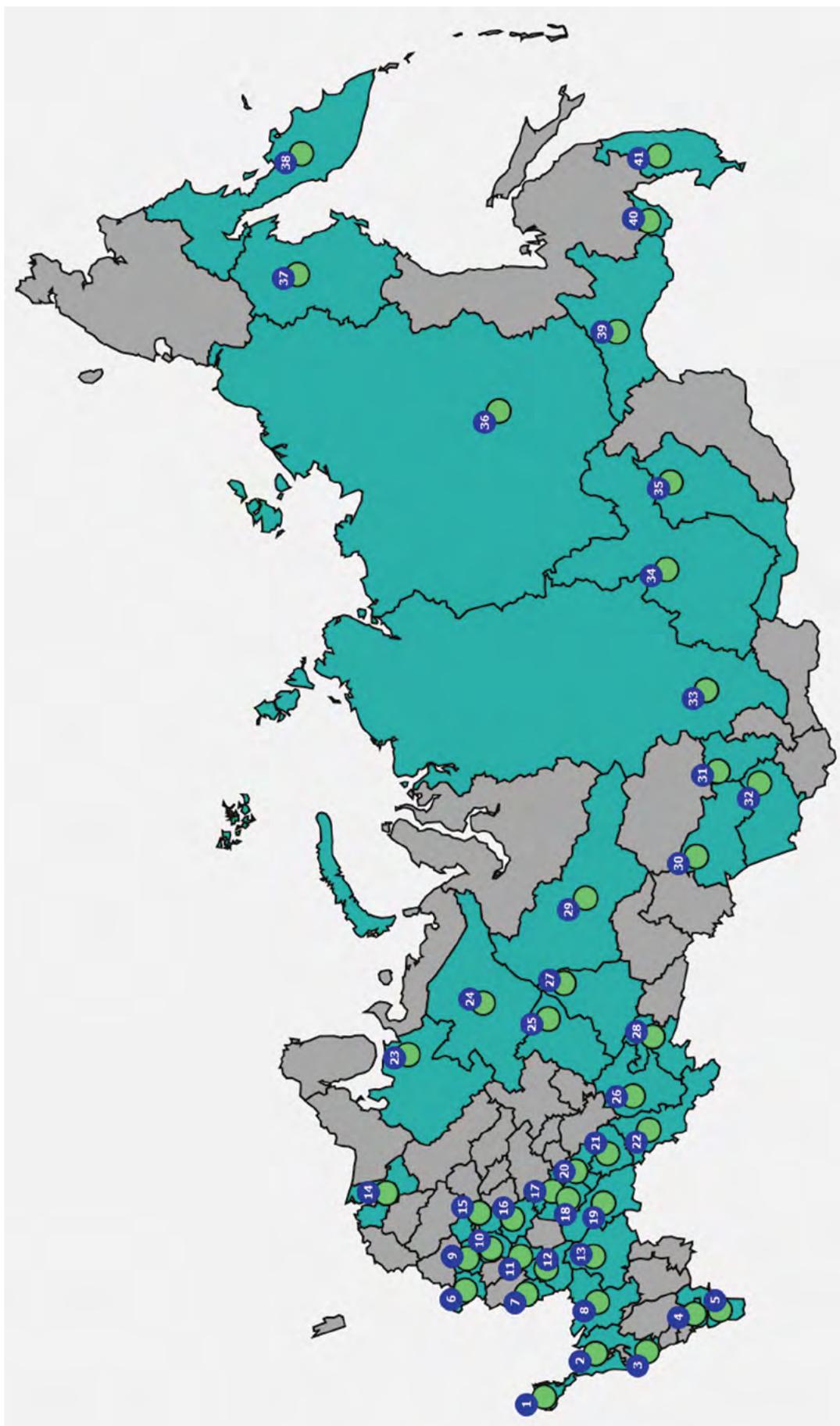


Рис. 12.2. Карта-схема размещения предприятий цементной промышленности Российской Федерации

Список предприятий

№ на карте	Субъект Российской Федерации	Наименование предприятия	№ на карте	Субъект Российской Федерации	Наименование предприятия
1	Республика Крым	АО «Бахчисарайский комбинат «Стройиндустрия»	23	Архангельская область	ЗАО «Савинский цементный завод»
2	Краснодарский край	ООО «Атакайцемент» ОАО «Верхнебаканский цементный завод» ОАО «Новоросцемент»	24	Республика Коми	ООО «Цементная северная компания»
3	Карачаево-Черкесская Республика	АО «Кавказцемент»	25	Пермский край	ПАО «Горнозаводскцемент» ОАО «Пашайский металлургическо-цементный завод»
4	Чеченская Республика	АО «Чеченцемент»	26	Республика Башкортостан	Филиал ООО «ХайдельбергЦемент Рус» в г. Стерлитамак
5	Республика Дагестан	ООО «Буйнакский цементный завод»	27	Свердловская область	АО «Невьянский цементник» ООО «Староцементный завод»
6	Брянская область	АО «Мальцовский порландцемент»			ОАО «Суходоложскцемент»
7	Белгородская область	ЗАО «Белгородский цемент» ЗАО «Осколцемент»	28	Челябинская область	ООО «Дюкерхофф Коркино Цемент» ЗАО «Катавский цемент» ООО «Магнитогорский цементно-огнеупорный завод» ООО «Мечел-Материалы»
8	Ростовская область	ЗАО «Угледорск-Цемент»	29	Ханты-Мансийский автономный округ	ООО «Югорский завод строительных материалов»
9	Калужская область	ОБП ОАО «Лафарж Цемент» (п. Ферзиково) Филиал «ООО ХайдельбергЦемент Рус» в п. Новогуровский	30	Новосибирская область	ООО «Искитимский завод строительных материалов» АО «Искитимцемент»
10	Тульская область	АО «Липецкцемент»	31	Кемеровская область	ООО «ПК «КЦЗ» ООО «Топкинский цемент»
11	Липецкая область	АО «Липецкцемент»	32	Алтайский край	ОАО «Цемент»
12	Воронежская область	Воронежский филиал «ЕВРОЦЕМЕНТ груп»	33	Красноярский край	Заполярный филиал ПАО «ГМК «Норильский никель» ООО «Ачинский цемент» ООО «Красноярский цемент»
13	Волгоградская область	АО «Себряковцемент» АО «Пикалевская сода»	34	Иркутская область	ОАО «Ангарскцемент» ООО «Тимлюйский завод» ООО «Тимлюйцемент»
14	Ленинградская область	АО «Пикалевский цемент» ООО «Петербургцемент» ОАО «ЦЕСЛА»	35	Республика Бурятия	ОАО ПО «Якутцемент» ООО «Сахцемент Лунсин»
15	Московская область	ООО «Холсим (Рус) СМ» (г. Коломна) Филиал ОАО «Лафарж Цемент» (г. Воскресенск) ОАО «Подольск-Цемент»	36	Республика Саха (Якутия)	ОАО «Колымацемент» ОАО «Камчатцемент» ООО «С Технология»
16	Рязанская область	АО «Михайловцемент»	37	Магаданская область	ОАО «Колымацемент»
17	Республика Мордовия	ООО «Серебрянский цементный завод»	38	Камчатский край	ОАО «Камчатцемент»
18	Пензенская область	ПАО «МОРДОВЦЕМЕНТ» ООО «Азия Цемент»	39	Амурская область	ООО «С Технология»
19	Саратовская область	ООО «Холсим (Рус)» (г. Вольск) АО «ХайдельбергЦемент Волга»	40	Еврейская автономная область	ОАО «Теплозерскцемент»
20	Ульяновская область	ООО «Сенгилеевский цементный завод» АО «Ульяновскцемент»	41	Приморский край	АО «Спасскцемент»
21	Самарская область	ЗАО «Жигулевские стройматериалы»			
22	Оренбургская	АО «Новотроицкий цементный завод» ООО «Южно-Уральская ГПК»			

Применение цементов в строительстве не было известно на ранних стадиях цивилизации. В древние времена постройки возводились из земли, иногда насыпанной чередующимися слоями в форме стен или сводов, а также из каменных глыб, уложенных друг на друга и не скрепленных вяжущим материалом. Устойчивость таких стен зависела исключительно от правильной укладки тяжелых каменных глыб без всякого участия адгезии. Хотя по этому способу были созданы замечательные сооружения, как, например, сводчатые храмы в Микенах, где между крупными блоками уложены мелкие каменные клинья для уплотнения швов, в последующие времена циклопические постройки все чаще уступают место каменной или кирпичной кладке на пластичном вяжущем материале.

Цемент (нем. Zement, от лат. Caementum — щебень, битый камень) можно охарактеризовать как вяжущее вещество, обладающее способностью связывать отдельные куски или массу твердых материалов. Это определение охватывает большое количество самых различных веществ, у которых общее, в сущности, только одно свойство — вяжущая способность. Основным свойством вяжущих материалов является, прежде всего, способность после добавления воды образовывать коллоидальные растворы, сообщающие тесту пластичность и, вследствие этого, легкую и удобную обрабатываемость в многообразных случаях применения в строительстве: для заполнения швов, для штукатурных и кровельных обмазок и т. п.

Другое важное свойство вяжущих веществ — способность твердеть после затворения и с течением времени приобретать прочность. Таким образом, строительными вяжущими веществами называют материалы, которые, будучи в порошкообразном состоянии смешаны с водой, образуют пластичную и легко перерабатываемую массу, с течением времени затвердевающую в прочное камневидное тело.

Строительные растворы, так же как и бетон, существовали с древних времен. Известно, что их применяли еще при постройке египетских лабиринтов, древних мексиканских пирамид, использовали для возведения городских стен, башен и крепостей.

Интересно, что во все времена принцип формирования компонентного состава строительных растворов был практически одинаков. В состав строительных растворов всегда входило вяжущее вещество, заполнитель и вода; иногда — дополнительная примесь для придания раствору особых свойств. При этом, несмотря на одинаковый набор компонентов, химические составы строительных растворов в разных странах имели существенные различия, обусловленные, прежде всего, географическими факторами.

Первым воздушным вяжущим и одним из основных строительных материалов древности была глина. Это естественное вяжущее не требует предварительной термической обработки и помола, а нуждается лишь в разминании и увлажнении. Поэтому глина очень проста в использовании.

С развитием строительства и применением очага возникло изготовление искусственных вяжущих веществ с термической обработкой сырья. Простейшие очаги древние люди складывали из камней на глиняном растворе. Наблюдение за превращением глиняного раствора под действием огня в прочный гончарный черепок постепенно привело человека к изготовлению керамической посуды и кирпича. Импровизированный очаг, представлявший собой заглабление, выложенное камнями известняка или глины, явился предметом дальнейших наблюдений человека. Случайно попадавшийся между камнями порошок известняка или гипса под действием огня подвергался декарбонизации или дегидратации (обжигался). Первый же дождь превращал обожженный порошок в тестообразную массу, которая, высыхая, прочно связывала прилегающие камни в монолитную массу.

Шло время, и уже другие вяжущие материалы, получаемые искусственным путем и способные при затворении (замешивании) водой превращаться в пластичную массу, отвердевая при этом не только на воздухе, но и в водной стихии, были созданы пытливыми умами человечества.

Первые семнадцать с половиной веков нашей эры почти не внесли существенных изменений в производство вяжущих материалов. Известь, гипс и глина по-прежнему оставались основными строительными вяжущими.

Необычайное развитие естествознания и техники во второй половине XVIII — первой половине XIX в. и рост потребности в водостойких вяжущих вызвали прогресс и в области производства и применения вяжущих. Обжиг соответствующего природного известково-глинистого сырья позволил изготавливать со второй половины XVIII в. все в больших масштабах естественные гидравлическую известь и романцемент. Однако ограниченность запасов такого сырья побудила перейти в первой половине XIX в. к более сложному производству гидравлической извести и романцемента путем составления из двух природных компонентов искусственных известково-глинистых смесей и их обжига, что привело к производству во второй половине XIX в. портландцемента.

Техника гидравлических строительных растворов стояла в течение ряда веков на точке замерзания, и «пуццоланы» часто доставлялись в отдаленные от места нахождения страны, несмотря на значительные расходы по перевозке. Причина такого положения вещей заключалась в том, что строителям не были известны как состав пуццолан, так и сущность их гидравлического действия на известковое тесто. Здесь техника ждала толчка от научной идеи, от научного открытия, и первыми, осветившими вопрос о причинах образования гидравлических растворов, были знаменитый французский инженер Вика³ и профессор мюнхенского университета Фукс⁴. Фукс установил, что пуццоланы содержат в своем составе активный кремнезем, который, взаимодействуя с известью, образует силикаты кальция типа $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{SiO}_2 = \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$.

Независимо от профессора Фукса Вика произвел большое количество исследований над глинами и установил, что почти все глины после надлежащего обжига приобретают свойства пуццолан. А так как глины находятся повсеместно, то казалось, что изготовление подобных «пуццолановых цементов» должно было получить преобладающее значение в практике строительного дела. Однако прогресс цементной техники пошел по другому пути — вследствие случайных открытий нескольких англичан-практиков.

В середине XVIII в. известный английский инженер-строитель Дж. Смитон⁵ при строительстве Эддистонского маяка (рис. 12.3) для получения извести использовал известняки с близлежащих карьеров.

Известняки имели в своем составе большое количество примесей глины, и считалось, что они не пригодны для получения воздушной жирной извести. Дж. Смитон с целью экономии все же обжигал эти известняки и получал известь, которая хотя и слабо, но гасилась и обладала вяжущими свойствами.

Однако Смитон заметил в этом вяжущем важное свойство — твердеть в воде. Дж. Смитон обратил внимание на то, что под действием воды негашеная известь в смеси с глиной затвердевает. Он добавил к этому составу песок и каменный шлак и получил довольно прочное вещество, которое использовал при строительстве фундамента под Эддистонский маяк. Так была впервые открыта гидравлическая известь.

В 1796 г. англичанин Джеймс Паркер, намереваясь получить гидравлическую известь из «глинистых почек» острова Шеппи в устье Темзы, обнаружил, что полученный продукт

³ Луи Жозеф Вика (1786–1861) — французский инженер, с 1833 г. — член-корреспондент французской Академии наук, исследователь гидравлической извести и цементов, пригодных для постройки мостов, в честь которого назван прибор для определения нормальной густоты и сроков схватывания цемента.

⁴ Иоганн Непомук Фукс (1774–1856) — немецкий химик и минералог.

⁵ Джон Смитон (1724–1792) — английский инженер по гражданскому строительству, ввел много усовершенствований в конструкцию водяных и ветряных мельниц, водолазного колокола и паровой машины, сумел наладить производство гидравлического цемента, забытого со времен Древнего Рима. В 1771 г. основал Инженерное общество.

совершенно не гасится водой, но при измельчении его в тонкий порошок быстро схватывается и твердеет. В связи с высоким (30–35%) содержанием глины в новом сырье Паркер обжигал его в известковых печах, но при более высокой температуре, которая была недостаточна для спекания и остекловывания материала, но уже исключала возможность гашения продукта (клинкера). Клинкер надлежало превращать в порошок механически или иным способом. Новый цемент коричневым цветом напоминал древние римские смеси из извести и пуццоланы, и Паркер назвал его римским цементом. Позже Дж. Паркером был приобретен патент⁶ на открытый им материал, который он назвал романцементом (римским цементом).

Впоследствии Вика установил, что «глинистые почки» есть не что иное, как мергель, т. е. известняк, сильно загрязненный глиной.



Рис. 12.3. Последний, четвертый 49-метровый Эддистонский маяк, рядом с которым останки его предшественников, светит уже 128 лет

⁶ Патент № 2120 от 27 июля 1796 г., выданный Джеймсу Паркеру из Портфлита, близ Лондона, графство Кент, на новый цемент для строительных целей, фиксирует изобретение им «определенного цемента или трасса для использования в подводных и других сооружениях и штукатурных работах».

Сырье, подобно английским «глинистым почкам», было распространено и на французском берегу Па-де-Кале, например у Булони, где его называли галетами (от франц. галька). Здесь военный инженер Лесаж в 1796–1801 гг. провел предварительные опыты и организовал производство из галет цемента, подобно паркеровскому. Во Франции цементы тоже получили название романских цементов, или быстротвердеющих (быстросхватывающих), но впоследствии из естественных глинистых известняков стали делать и медленно схватывающие цементы, почему за всеми цементами этого рода оставлено только название «романских», без других характеристик. Большие неудобства, зависящие от неоднородности глинистых известняков, повели к дальнейшим весьма важным открытиям в приготовлении цементов. Известняки с малым содержанием глины дают гидравлическую известь, с большим содержанием — гидравлические цементы разных характеристик.

Производство романцемента в Центральной Европе восходит к 1829–1830 гг., когда профессор И. Фукс представил свои работы об известях и растворах. В 1829 г. он показал, что всякий кремнеземистый минерал может быть годен для гидравлического цемента, если его подвергнуть обжигу. Такие породы, как граниты, гнейсы, порфиры, полевошпат, слюда и даже простая глина, не говоря о чистом кремнеземе (горный хрусталь, халцедон), после обжига с известью затвердевают под водой. Вопрос стоял только в доступности сырья и энергоемкости производства.

С 1837 по 1841 г. Л. Ж. Вика показал, что большая часть глин обладает свойством превращаться в пуццоланы вследствие обжига, т. е. затвердевать с известью под водой, почему продукт обжига глин и назвали искусственной пуццоланой (цемянкой). Интересно, что до настоящего времени для определения сроков схватывания цементного теста применяется прибор, который по имени его изобретателя называется прибором Вика.

Однако Вика не посчастливилось практически осуществить свою идею получения искусственного цемента. Вика показал, что это возможно, но практическое осуществление этой мысли получила в России и Англии. Первые цементные заводы возникли в Англии, а затем производство цемента распространилось по всему миру.

Изобретение портландцемента связывают с именами Джозефа Аспдина и Егора Челиева.

Зарождение цементной промышленности в мире

В декабре 1824 г. каменщик из английского города Лидса Джозеф Аспдин получил патент⁷ на «Усовершенствованный способ производства искусственного камня», который он создал на собственной кухне. Изобретатель нагрел смесь хорошо подробленного известняка и глины в кухонной печи, после раздробил комок смеси в порошок и получил гидравлический цемент, который затвердел при добавлении воды.

Идея о возможности изготовления из искусственной смеси известняка и глины «цемента, который был бы равен лучшему рыночному портландцементному камню по твердости и долговечности», принадлежит Дж. Смитону. Д. Аспдин же первый дал гидравлическому вяжущему название «портландцемент» (потому что при производстве он использовал камни с карьера, который находился на острове Портланд) и является изобретателем этого названия. В 1825 г. Аспдин основал заводское производство своего «портландцемента» в Йоркшире, недалеко от Лидса. Новый цемент не был аналогичен современному портландцементу, но стал предпочитаться крупными строителями того времени всем остальным цементам, и производство его получило в Англии большое развитие.

Однако только 30 лет спустя после этого открытия английские портландцементы получили распространение, а затем и преобладание. Толчок дала Лондонская всемирная выставка 1851 г., после которой на континенте весь портландцемент назывался английским.

⁷ Патент № 5022 от 15 декабря 1824 г. «Искусственный камень. Усовершенствования Аспдина в способах производства искусственного камня».

Полученное Аспдином вяжущее не было портландцементом в современном смысле этого слова (Аспдин не доводил смесь до спекания, что является основным условием получения портландцементного клинкера), а представляло собой разновидность романцемента, полученного при несколько повышенной температуре обжига (900–1000°С), однако название «портландцемент» сохранилось и поныне.

Гидравлическое вяжущее, описанное Е. Г. Челиевым, было ближе по свойствам к современному портландцементу, а по качеству превосходило портландцемент Аспдина. Но Аспдин основал заводское производство цемента (рис. 12.4), развитое его сыном Уильямом, и получил всемирное признание.

Широкое распространение и известность цемент получил после Лондонской всемирной выставки 1851 г., после которой на континенте весь портландцемент был английский до 1878–1880 гг., когда, наконец, производство его стало широко развиваться в Германии. С этого времени цемент стал применяться практически повсеместно.

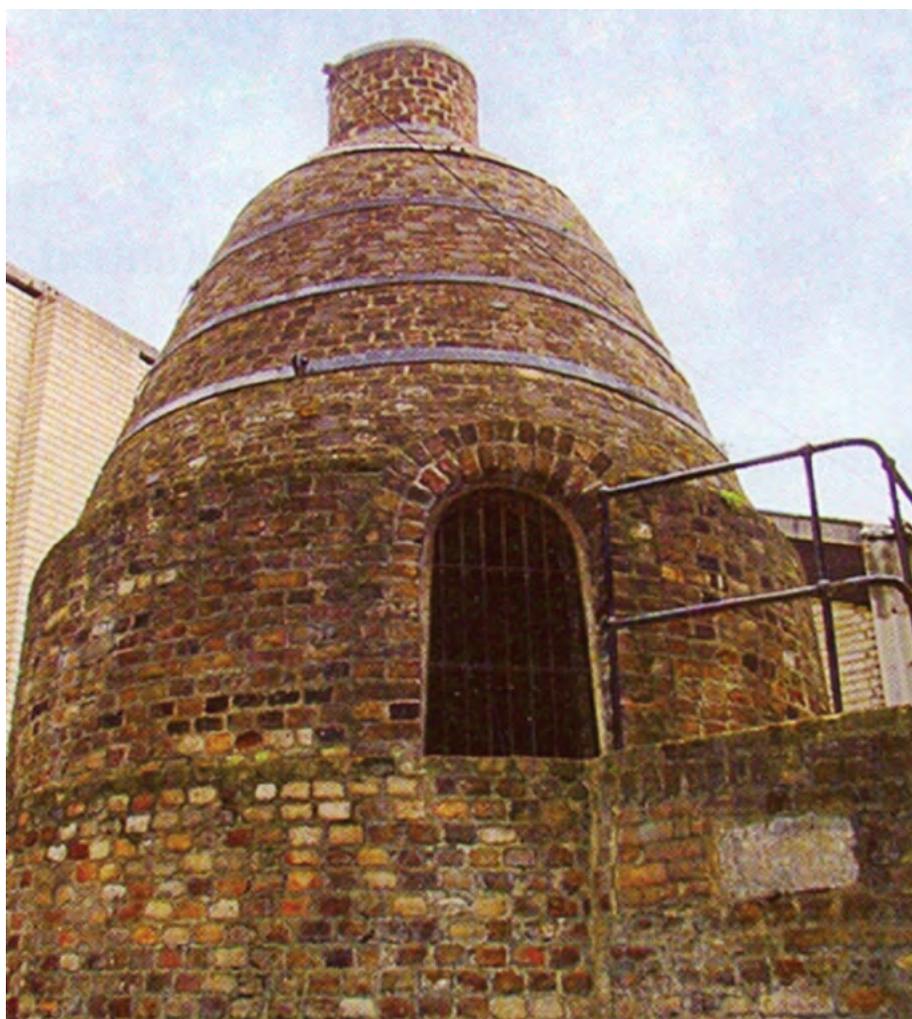


Рис. 12.4. Заводская печь для обжига портландцемента на предприятии Аспдина. Печь Аспдина на построенном им заводе «Робинс и Аспдин», 1847–1848 гг.

Технология изготовления цемента получила широкое распространение, и в каждом государстве промышленники строили свой собственный цементный завод, а то и не один. Купить цемент стало значительно проще, уже не требовалась переброска цемента морем.

Сыновья Аспдина Уильям и Джеймс вначале выпускали на созданных предприятиях «аспдиновский» цемент, а начиная с 1848 г. фирма «Робинс, Аспдин и Компания» начинает производство настоящего портландцемента.

Во Франции впервые портландцемент начала производить в 1868 г. компания «Лафарж» в городе Тей, коммуна Ардеш. Хотя первый завод по производству цемента во Франции был построен в 1846 г. в городе Булонь-сюр-Мер, однако он выпускал популярный в то время романцемент.

Первый завод по производству портландцемента в Германии возник в Цюльхове⁸ близ Штеттина в 1855 г. Цемент, производившийся из местной глины и мела с острова Волина, по качеству не уступал английскому, и вскоре производство выросло до 30 000 бочек в год.

Такой успех породил устройство подобных заводов в Бонне, Леббине, Оппельне, Люнебурге, Аменебурге, Финкельвальде. К 1877 г. в Германии насчитывалось уже 30 заводов по производству портландцемента.

Цементные заводы (фабрики по производству цемента) появляются повсеместно там, где обнаруживают большие залежи известняков и глин. Например, в Германии в 1859 г. при исследовании месторождений бурого угля в предместье Хеммоор натолкнулись на мощные пласты мела и глины. В 1862 г. на этом месте Юрген-Гинрих Хагенах сооружает кирпичный завод и предприятие по производству извести, а в 1866 г. здесь появляется маленькая фабрика по производству цемента «Хеммоор». В 1882 г. акционерное общество «Фабрика портландцемента Хеммоор» при 1000 рабочих выпускало уже в год 170 000 бочек цемента.

Первый цементный завод в США *Coplay Cement Company* был основан в 1866 г. Дэвидом О. Сейлором в долине Лихай штата Пенсильвания. Дэвид О. Сейлор считается «отцом» американской цементной индустрии. Именно этот цементный завод, ныне музей, принадлежал Сейлору, и, конечно, музей был основан в его честь.

Графство Лихай — естественный источник сырья для производства цемента. В 1871 г. Сейлор получил патент на производство портландцемента, который был гораздо прочнее и качественнее, чем так называемые натуральные цементы, производимые в США до этого времени. Из цемента Сейлора строились мосты, дороги, небоскребы, акведуки, административные и жилые здания. В 1900 г. в долине Лихай производилось 72% всего портландцемента в США. Сначала были возведены доменные печи, однако они работали крайне неэффективно, и их быстро закрыли. Уже в 1893 г. были построены печи, которые мы можем наблюдать и сейчас, т. е. вертикальные печи Schoefer⁹ (рис. 12.5). Для производства цемента использовались 11 вертикальных печей, которые были высотой 90 футов¹⁰ (27,4 м).

Печи в долине Лихай — датская модификация вертикальных немецких печей, были построены из местного красного кирпича. По сравнению с купольными печами эти печи выпускали более качественный продукт (печи непрерывного действия). Однако и они проработали недолго. В 1904 г. вертикальные печи были закрыты, так как появились более эффективные и производительные горизонтальные вращающиеся печи.

Изобретателями вращающейся печи являются Элльот и Руссель, которые в 1853 г. получили патент на вращающуюся механическую содовую печь (рис. 12.6). Изобретение этих печей имело большое значение не только в прогрессе содового производства, но и в других отраслях промышленности, в том числе и цементной.

⁸ До 1945 г., когда Штеттин был частью Германии, немецкое название этого пригорода было *Stettin-Züllchow*. В настоящее время *Żelechowa* — муниципальный район города Щецин (Польша).

⁹ К настоящему времени из 11 печей сохранилось только 9, которые компания *Coplay Cement Company* в 1975 г. передала местным властям. С тех пор Сейлор-парк — промышленный музей, который с 1980 г. включен в перечень Национального достояния США.

¹⁰ 1 фут ≈ 0,305 м.



Рис. 12.5. Цементные печи Sorlay Company

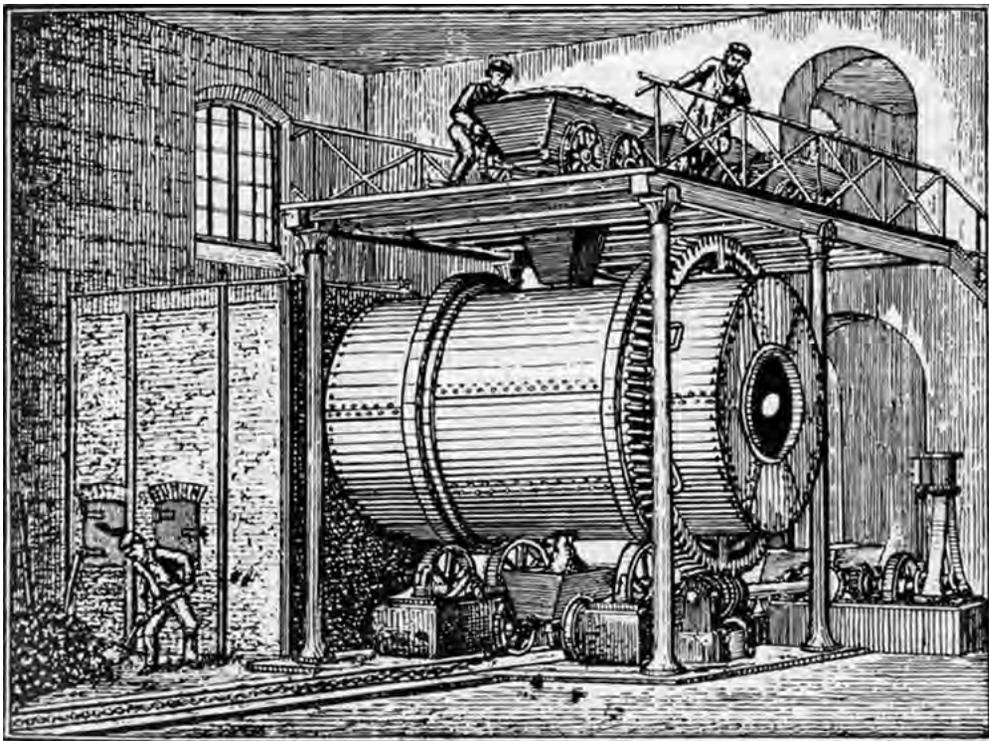


Рис. 12.6. Первая вращающаяся печь

Механическая вращающаяся печь приводилась в движение паровым двигателем и вмещала 196,5 пудов сырьевой шихты.

В цементной промышленности вращающуюся печь впервые применил Фредерик Рэнсон (патент в Англии 1885 г., США 1886 г.). В Европе «лежачие» вращающиеся печи вместо

«стоящих» проходных шахтных печей стали распространяться известнейшими строителями Ф. Л. Смидтом¹¹ в Копенгагене и А. Г. Э. Полизиусом¹² в Дессау.

Вращающаяся печь представляла собой футерованный огнеупорами металлический цилиндр, опирающийся на роликовые опоры. Для передвижения обжигаемого материала в печи ее устанавливали под углом 4–5° к горизонту. Печь приводили в движение от электродвигателя. Сырьевая смесь, загружаемая с холодного конца, двигалась при вращении печи навстречу продуктам горения топлива.

Одна из первых печей имела длину 11 м и диаметр 1,5 м, а в 1900 г. уже имелись печи диаметром 2 м и длиной 35 м. Их суточная производительность составляла 30 т (одна из самых длинных печей 232 × 7,6 м, производительностью до 3000 т/сутки была установлена компанией F. L. Smidth в 1964 г. на заводе Данди Клаксвилл, США).

Дробилку (мельницу) для измельчения клинкера изобрел в 1892 г. французский инженер Дэвидсен. Внутри она была футерована кварцевыми плитками, а в качестве мелющих тел использовалась морская галька.

В мировой прессе широко рекламировался цемент, и публика перестала воспринимать новый материал как нечто странное и пугающее. А после того как британская армия и флот взяли его в буквальном смысле слова на вооружение, цементом заинтересовался генералитет всех более или менее развитых стран. Немцы начали самостоятельное освоение производства цемента, поскольку англичане отправляли на экспорт готовую продукцию, а отнюдь не секреты технологии ее производства.

Зарождение цементной промышленности в России

Промышленное производство цемента в России имеет уже вековую историю. Если брать за исходную точку первое официальное упоминание о нем, то оно датируется XVII в. В письме князю М. П. Гагарину, тогдашнему коменданту Москвы, Петр I дает поручение прислать несколько бочек извести. Примечательно, что затем слово «известь» было зачеркнуто и исправлено на «цементъ». Вполне возможно, что в данном случае речь шла об одной из разновидностей цемента, а именно романцементе, производимом в те далекие времена, поскольку первый цементный завод в России был построен и запущен в эксплуатацию в 1856 г., и производил он портландцемент.

Вначале в Россию начался ввоз английского цемента для строительства портовых сооружений и крепостей. Французский классик цементного производства и бетонного

¹¹ Концерн «Ф. Л. Смидт» (FLSmidth) основан в 1882 г. инженером Фредериком Лессо Смидтом в качестве консультирующей фирмы по паровым двигателям и мельницам. С 1884 г. фирма специализировалась на проектировании оборудования для производства кирпича и черепицы, а с 1887 г. после прихода инженеров Поля Ларсена и Александра Фосса компания изменила свое название на F. L. Smidth & Co и стала заниматься проектированием цементных заводов. Первый цементный завод был построен в Швеции в г. Лимхамн в 1887 г. Затем компания построила несколько цементных заводов в Швеции, Норвегии и Дании и стала лидером в технических усовершенствованиях цементного производства. В 1893 г. компания приобрела у французско-датского изобретателя права на новый тип мельницы — трубную мельницу. В 1893 г. представители компании со своими технологиями прибыли в Санкт-Петербург. Первый цементный завод они построили в порту Кунда (Эстония). К 1914 г. почти все заводы в России были либо построены, либо модернизированы «Ф. Л. Смидт». В окрестностях Петербурга — это Глухоозерский цементный завод и завод «Железо-цемент». Сегодня FLSmidth — транснациональная компания, занимающаяся разработкой технологий и производством оборудования для горнодобывающей, обогащающей и цементной промышленности. Объединяет 125 компаний в 15 странах мира. В прошлом году годовой оборот предприятия составил 1,4 млрд евро.

¹² ThyssenKrupp Polysius — фирма, входящая в состав концерна ThyssenKrupp. Осуществляет поставки оборудования для горнодобывающей, металлургической, химической, энергетической и цементной отраслей промышленности. Во всем мире в фирме работает более 1600 человек. Компания была создана в 1859 г. Андреасом Готфридом Эрнестом Полизиусом, открывшим собственную мастерскую в г. Дессау. В 1971 г. компания была приобретена концерном «Крупп». В 1999 г. фирма Polysius AG стала частью объединенного концерна ThyssenKrupp.

строительства Луи Жозеф Вика, который разработал принципы производства цемента в том виде, в каком они существуют до сего дня, учил будущих русских инженеров-путейцев, что для получения цемента необходимо спекать известняки и глины и размалывать полученные куски до состояния порошка. Самым удивительным было то, что на необъятных пространствах России было немало мест, где имелись залежи глины, известняков и каменного угля. Это позволяло организовать массовое производство цемента, но его продолжали ввозить из Англии на протяжении многих лет.

Во второй половине XVII в. в Москве развернулось строительство каменных и кирпичных мостов и гидротехнических сооружений. Первые руководства по изготовлению неорганических веществ появились в XVIII в. Они обобщали опыт русских ученых с описанием способов получения строительного гипса и гидравлической извести. Так, В. М. Севергин доказывал целесообразность использования известняков с глинистыми примесями, а также мергелистых пород для получения водоустойчивых вяжущих веществ. Обжиг извести и изготовление цемента (гидравлической добавки) по данным 1724–1727 гг. рассмотрены уже в первом русском обобщающем статистико-экономическом труде И. К. Кирилова «Цветущее состояние Всероссийского государства». В Петербургском институте путей сообщения в 1822 г. проф. Шарлевилем¹³ были опубликованы научные исследования мергелистых пород для получения гидравлической извести и цементов. Автор указывал, что при обжиге таких пород или смесей известняков и глин возникают химические взаимодействия между составными частями.

В 1839 г. купец и фабрикант И. В. Юнкер основал в Петербурге фабрику для изготовления «паркеровского», или «английского» цемента. Фабрика, или «Английский цементный завод», находилась у старой Московской заставы и работала на «цементном камне», доставлявшемся из Англии. В 1839 и 1840 гг. было выпущено 1 и 5 тыс. бочек цемента Юнкера по 10 пудов в каждой. Романцемент Юнкера широко применялся не только в Петербурге, но и в Москве и заслужил высокую оценку строителей. Позже подобный цемент выпускали и из местного сырья на заводах П. Е. Роше¹⁴ под Петербургом (1848) и Филатьева¹⁵ под Москвой (1849), что имело большое значение для строительства. Завод Роше работал в течение 57 лет и выпускал отличный романцемент (для производства цемента вначале использовали волховский известняк, а затем известняк стали брать из тосненских каменоломен), которым с огромным экономическим эффектом заменяли в различных подводных и наземных сооружениях английский портландцемент, стоивший втрое дороже.

Первое в России описание вяжущего вещества, полученного путем обжига мергеля с последующим помолом, дал в 1807 г. академик В. М. Севергин¹⁶. Полученный продукт по

¹³ Антуан Рокур де Шарлевилль (1789–1841) — французский инженер и публицист, член-корреспондент (1827). В 1821–1826 гг. — на русской службе, был профессором Института путей сообщения в Санкт-Петербурге, в 1822 г. опубликовал «Трактат об искусстве изготовления хороших строительных растворов и правильного их использования».

¹⁴ Павел Егорович Роше — инженер-генерал-майор, профессор строительного искусства в Николаевской инженерной академии и Николаевском инженерном училище. В конце 1840-х гг. он начал разрабатывать цемент; работы его увенчались полным успехом, и цемент «Роше» употребляется едва ли не до сих пор.

¹⁵ Подольский помещик Филатьев — подрядчик по постройке Курской железной дороги, владел несколькими подольскими каменоломнями, где добывали карбоновые известняки и доломиты Подольского и Мячковского горизонтов.

¹⁶ Василий Михайлович Севергин (1765–1826) — российский химик, минералог, геолог, академик Императорской академии наук (1793). В многочисленных мемуарах и статьях Севергина излагаются предметы, относящиеся к области минералогии, физики, химии, физики Земли, технологии сельского хозяйства. Кроме этого, Севергину принадлежит ряд переводов с иностранных языков. Заслуги Севергина как переводчика заключаются в том, что он при переводе делал различные добавления на основании новейших открытий, давал критическую оценку трудов и воззрений иностранных авторов, делал добавления в сведениях, касающихся России.

качеству был лучше романцемента, но не портландцементом. Однако изобретателем нынешнего цемента считается Егор Герасимович Челиев.

Е. Г. Челиев начинал работать в Саратове. В 1801 г. он перебрался в Москву и спустя несколько лет был назначен на пост начальника Московской военно-рабочей бригады по планировке и восстановлению московских строений после пожара 1812 г. Именно тогда он начал проводить эксперименты с различными материалами, чтобы найти скрепляющий состав для кирпича и камня.

Испокон веку кирпич изготавливали из обожженной глины. На Руси швы традиционно заполняли обожженной известью, в которую для большей прочности добавляли мелкий кирпичный бой или крупнозернистый песок, поскольку известь обладает высокой паропроницаемостью, что создает комфортные условия внутри помещений. Кроме того, она является обратимым веществом, т. е. после замерзания и оттаивания превращается в тестообразную массу, которая, высыхая, вновь приобретает прочность. По сей день существуют сторонники известковых растворов, которые считают, что это связующее увеличивает срок службы кладки.

Однако главный недостаток извести состоит в том, что она не высыхает и быстро вымывается во влажной среде, т. е. совершенно не подходит как связующее для строительства цоколей и подвалов. Кроме того, известь недостаточно прочно соединяет кирпич с натуральным камнем, который, как правило, использовался в основаниях зданий. А при восстановлении Москвы после 1812 г. оставшиеся без кровли и деревянных перекрытий дома были затоплены, и их стены лишились несущей способности.

Стремление получить еще более совершенный вид гидравлического вяжущего привело русского строителя Е. Челиева к важному открытию: при обжиге в горне на сухих дровах смеси извести и глины до «белого жару» (при температуре свыше 1100–1200°С) получался спекшийся продукт, обладавший в измельченном виде высокими механическими свойствами и способностью твердеть в воде.

В 1822 г. Е. Челиев в книге «Трактат об искусстве готовить хорошие строительные растворы» публикует результаты получения вяжущего материала из смеси извести и глины. А в 1825 г. в Петербурге выходит новый труд Е. Челиева «Полное наставление, как готовить дешевый и лучший мертель, или цемент, весьма прочный для подводных строений, как-то: каналов, мостов, бассейнов и плотин, подвалов, погребов и штукатурки каменных и деревянных строений», где он обобщает накопленный опыт улучшения свойств вяжущих материалов, полученный при восстановлении Кремля, разрушенного во время Отечественной войны 1812 г. (рис. 12.7).

При этом автор указывал на то, что книга написана им «по опыту произведенных в натуре строений». В книге всего 28 страниц текста и две таблицы чертежей. «Ныне употребляемый раствор обходится несравненно дороже предлагаемого в сем сочинении мертеля, который, не требуя сих предосторожностей, в деле выходит много лучше, не распадается на воздухе

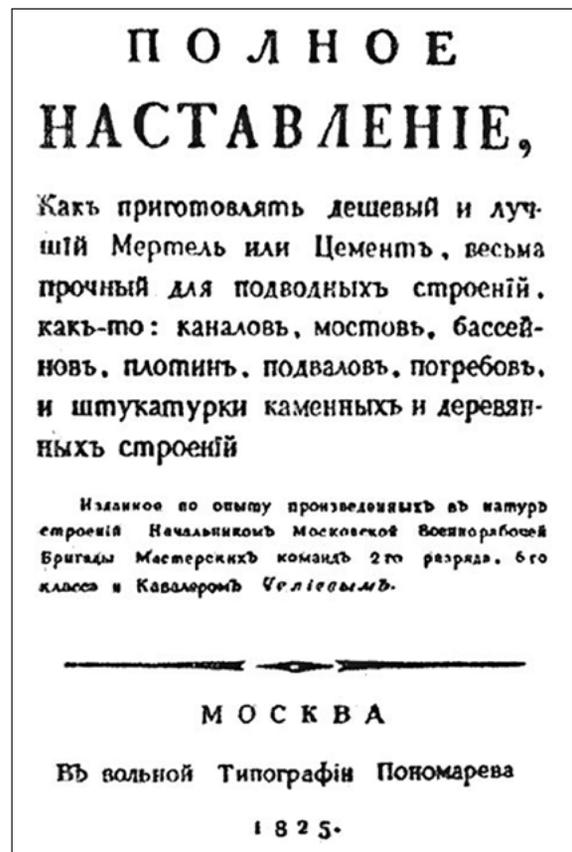


Рис. 12.7. Титульный лист книги Е. Г. Челиева

и от времени крепчает в воде...» — пишет изобретатель в своей книге. Кроме новшеств в составе, их было много и в самом процессе изготовления цемента.

Специалисты считают, что «эта книга неизмеримо выше по своему уровню, чем проникнутое эмпиризмом и недомолвками патентное описание портландцемента Джозефа Аспдина».

Русский исследователь дает точный состав, описывает детали производства, приводит экономические расчеты и разъясняет процессы с точки зрения химии, которую он глубоко знал.

Прежние мертели, растворы извести с песком, толченой черепицей или кирпичной мукой Е. Челиев предлагает заменить новым мертелем, точнее, цементным тестом. Для изготовления своего цемента он составлял искусственную сырьевую смесь из извести и глины в пропорции, зависящей от состава исходных компонентов и установленных предварительными испытаниями. Смесь подвергалась обжигу, продукт которого после измельчения и просеивания и являлся мертелем, или собственно цементом.

В качестве сырьевых материалов Челиев рекомендует тощую глину (в том числе обыкновенную красную, кирпичную) и известь, которая уже совершенно от воздуха и воды распустилась.

При этом Челиев упоминает, что при отсутствии извести возможна ее замена мусором от известковых стен или старого штукатурного отслужившего основания, которые содержат гашеную известь. Челиев объясняет, почему во всех указанных случаях он использует ранее обожженную гашеную известь, указывая на ее вяжущие свойства. Образующаяся при гашении пушонка ко времени использования и производства цемента в значительной мере снова превращается в исходный карбонат, сохраняя, однако, состояние тонкого измельчения и способность легко смешиваться с водой.

В «Общем примечании к составлению предложенных мертелей» Челиев останавливается на наиболее существенных деталях производственного процесса.

Со второй половины XIX в. портландцемент прочно вошел в строительную практику. В России над его созданием и совершенствованием много работал ученик Е. Г. Челиева проф. А. Р. Шуляченко¹⁷. Его заслуга состоит в том, что высококачественные отечественные портландцементы почти полностью вытеснили в России цементы иностранного производства.

А. Р. Шуляченко является учеником Д. И. Менделеева, с которым познакомился в середине 60-х гг. XIX в., когда работал в Петербургской инженерной академии. Готовясь в 1868 г. к чтению пробной лекции по химии, Шуляченко получает задание на ее подготовку от проф. Д. И. Менделеева. Лекция на тему «О гидравлической извести» получила положительный отзыв экзаменаторов, после чего Шуляченко был допущен к чтению лекций по химии «и приложению ее к строительному делу». С тех пор Менделеев внимательно следит за научной деятельностью Шуляченко, между ними возникают контакты. Уже в 1871 г. в вышедшей второй части капитального труда «Основы химии» Менделеев при описании свойств кремния и кремнеземистых соединений и взаимодействия их с известью ссылается на работы А. Р. Шуляченко.

¹⁷ Алексей Романович Шуляченко (1841–1903) — русский химик, «отец русского цемента», генерал-майор, военный инженер и заслуженный профессор. Основные труды посвящены теории твердения вяжущих (гидравлическая известь и портландцемент), изучению причин разрушения бетона в портовых сооружениях и изысканию способов его предупреждения. Участвовал в разработке первых Российских технических условий на цемент и научных номенклатур вяжущих. Первым предложил и научно обосновал применение смешанных (известково-цементных) строительных растворов для каменной кладки. Активно содействовал возникновению и развитию отечественной цементной промышленности. Стал одним из организаторов и председателем многих съездов цементной промышленности. Был учеником Д. И. Менделеева и, в свою очередь, стал учителем для многих, но все-таки делом всей жизни ученого стали работы по изучению, а затем и внедрению цементов.

Известно, что после написания и выхода в свет в 1871 г. второй части «Основ химии» Д. И. Менделеев непосредственно к химии и технологии цементного производства не возвращался и этими темами в своей научной деятельности не занимался. Но тем не менее он не выпускал из поля своего зрения развития цементного дела в России и зарубежных странах, всегда настаивал на необходимости распространения среди населения научных знаний вообще, в том числе и о цементе.

В 1894 г. Д. И. Менделеев обратился с письмом в Департамент торговли и мануфактуры с предложением организовать издание — «Библиотека промышленных знаний», состоящее из 20 томов. Восьмой том данного издания предусматривалось посвятить «выжиганию извести, производству строительных цементов, особенно портландцемента». Менделеев писал: «Приведу — не без гордости, — что мне уже заявили готовность принять на себя заранее определенную часть большого труда следующие лица: — Шуляченко Алексей Романович, профессор Николаевской инженерной академии».

Менделеев выступает горячим поборником организации широкого производства цемента в России. В «Письмах о заводах», опубликованных в журнале «Новь» в 1885 г., он пишет: «Достанет знания и сноровки, есть виды на сбыт в городе или на фабриках, — смело заводите и цементный завод, благо соответствующий материал, если не для высших, то для обычных сортов найдется всюду, а распространение растет ежедневно». Далее он кратко цифрами доказывает экономическую выгоду производства цемента и его применения при строительстве домов. Причем очень подробно описывает, какие конструкции можно выполнять из бетона, приготовляемого на основе цемента, — фундаменты, стены, полы, потолки, арки, блоки и т. д.

Хотелось бы обратить внимание на такой факт. В тех небольших заметках, где идет речь о цементе, Д. И. Менделеев обязательно касается экономических вопросов. Так, в главе «Каменный уголь и другие виды топлива» основной его экономической работы «Толковый тариф» (рис. 12.8), он приводит интересные данные о расходе угля на производство одного пуда цемента (от 30 до 20 фунтов), стоимости угля, его удельном весе в себестоимости цемента, обращая внимание на то, что этот вес в процентах очень высок. Этот вывод соответствует действительности сегодняшнего дня.

В седьмой главе «Толкового тарифа» помещена целая статья, посвященная цементу. В ней приводится влияние таможенных тарифов на рост производства цемента в России, цифры потребления цемента 100 лет назад, а также много интересных данных, например сообщается о ценах одного пуда цемента. Менделеев очень подробно рассматривает вопросы о том, какое положительное влияние оказала пошлина 1885 г. на развитие цементного дела в России.

И делает важное заключение, «что всякого природного добра, надобного для производства цемента, России не занимать

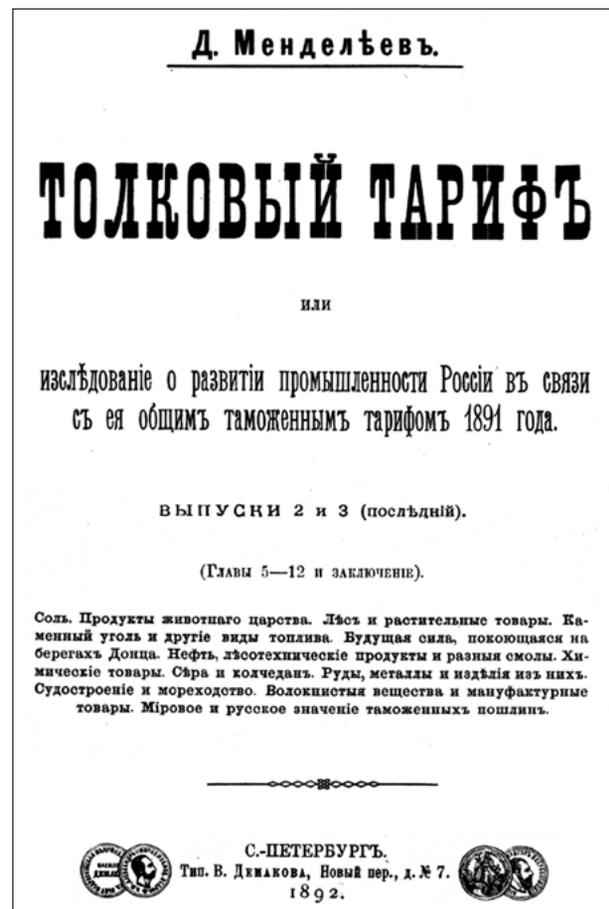


Рис. 12.8. Титульный лист книги Д. И. Менделеева «Толковый тариф» (1892)

стать, а потому, если цементное дело следует развивать, то следует при этом развивать и добычу своих материалов, для него применяемых, а потому иностранные не впускать беспешинно». Это позволяет говорить о том, что Д. И. Менделеев был первым экономистом только что зарождавшейся отечественной цементной промышленности.

Д. И. Менделеев не приводит перечень действующих в эти годы цементных заводов, а только указывает, что в 70-х гг. их было три, а в 1891 г. их число увеличилось до 12, и что цементные предприятия существуют в России от Балтийского до Черного моря на русских берегах. Попутно он указывает, что в эти годы производство цемента увеличилось с 0,5 до 7 млн пудов (с 8 до 112 тыс. т). Призывая к более широкому применению цемента в строительстве, Д. И. Менделеев отмечает, что «испытание русских цементов показывает, что многие из них ничем не уступают лучшим иностранным». В своих симпатиях к цементу Д. И. Менделеев категоричен: «Этому продукту — широкая будущность, он сделает будущие постройки более прочными, более дешевыми и легчайшими». Далее Менделеев убеждает соотечественников: «Цемент составляет драгоценнейший строительный материал, уже ныне играющий громадную роль, с течением же времени долженствующий вытеснить почти всех других соперников, потому что при его помощи зерна песка скрепляются в камни, в сплошные стены, в целые полы, потолки и своды, имеющие крепость прочнейших камней, недоступных влиянию воды и огня».

Уже в конце XIX столетия Д. И. Менделеев отмечает рост и широкое применение цемента во многих странах мира. В своей большой экономической работе «Учение о промышленности», опубликованной в 1900 г., он пишет: «В Англии, как повсюду за последнее время в строительном деле, особенно при сооружении мостов, портов и домов, стали заменять даже с некоторой выгодой в цене — при данной крепости — естественные камни отчасти искусственными, составленными с порландским цементом», и приводит некоторые цифры по производству цемента в США, Германии и России — число предприятий, количество работающих на них, оценка производства выпускаемой продукции в денежном выражении. Далее Д. И. Менделеев делает смелый вывод: «Цемент на памяти еще молодых людей был продукт редкий, применяющийся только в исключительных случаях, а теперь его стали производить повсюду».

Помимо А. Р. Шуляченко большой вклад в развитие науки о цементе и бетоне внесли Н. А. Белелюбский¹⁸ и И. Г. Малюга¹⁹. Русские ученые разработали первые технические условия на цемент и предложили классификацию вяжущих. Ими были заложены основы современной науки о твердении вяжущих материалов, разработаны методы испытаний материалов, вошедшие в международную практику. В 1881 г. были разработаны первые русские нормы на порландцемент с методами определения его свойств. В 1885 г. в России

¹⁸ Николай Аполлонович Белелюбский (1845–1922) — русский инженер и ученый в области строительной механики и мостостроения. В 19 лет окончил Петербургский институт инженеров путей сообщения, а в 25 лет был уже профессором этого института. Получил широкую известность в России и за границей как автор проектов ряда больших мостов. Создал первую в России лабораторию по испытанию строительных материалов. Впервые ввел применение литого железа в мостостроительстве в России, ранее, чем оно начало применяться в других странах. Являлся одним из наиболее энергичных пионеров в деле создания международной связи техников-строителей и ярким поборником и активным деятелем в насаждении в России женского высшего технического образования.

¹⁹ Иван Григорьевич Малюга (1853–1933) — русский ученый в области технологии строительных материалов. В 1879 г. окончил Инженерную академию в Петербурге. С 1885 г. преподавал там же (с 1891 г. профессор). Является одним из основоположников изучения и применения в России нового строительного материала — бетона. Впервые установил зависимость прочности и плотности цементных растворов и бетонов от различных факторов, разработал метод определения оптимального содержания воды в растворных и бетонных смесях для получения наибольшей прочности цементных растворов и бетонов.

был созван первый съезд по цементному производству. С 1872 г. стал выпускаться журнал «Зодчий», а с 1903 г. — журнал «Цемент».

Сбывается предсказание Д. И. Менделеева, писавшего в 1891 г., что цемент, составляющий одно из важнейших приобретений между приложениями химии к потребности жизни, есть строительный материал будущего.

ЦИКЛЫ РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЦЕМЕНТА В РОССИИ

Производство цемента в своем становлении и развитии прошло большой путь, что наглядно демонстрируют данные, представленные на рис. 12.9 и в табл. 12.1. Каждый новый виток спирали (цикл развития) базируется на новых технологических укладах. Как и каждое промышленное производство, производство цемента проходит несколько этапов развития — научно-технический, технико-экономический, экономически-социальный и социально-регуляторный. И каждый новый этап является «толчком» в развитии как оборудования и технологии, так и нового мировоззрения. И сегодня развитие цементной отрасли, как и промышленности в целом, идет по пути эколого-ориентированного научно-технологического развития и формирования нового регулирования на основе наилучших доступных технологий для модернизации отраслей промышленности через их «озеленение»: развитие энерго- и ресурсоэффективных технологий при одновременном снижении негативного воздействия на окружающую среду.

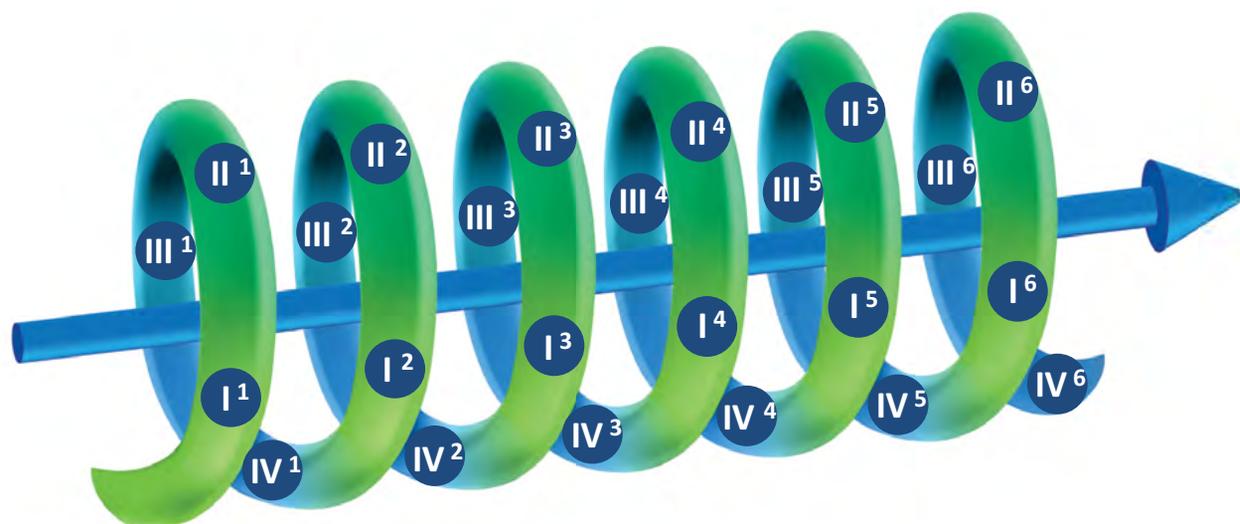
Но вернемся в первую половину XIX в. Перемены в развитии цемента в России наступили лишь тогда, как Российской империи необходимо было в спешном порядке укреплять фортификационные сооружения в Крыму. Однако дружественная Турции Великобритания в 1852 г. ввела запрет на экспорт «английского» цемента в Россию. Романцемент, производимый на заводах П. Е. Роше под Петербургом и Филатьева под Москвой, был нестабильного качества. Поэтому отсутствие экспорта из Англии компенсировали за счет экспорта из Германии, где для нужд российской обороны стал работать новейший и мощнейший по тем временам цементный завод в Штеттине (теперь польский Щецин).

В шестидесятых годах позапрошлого века, после отмены крепостного права, в России бурно начал развиваться промышленный капитализм. Строились фабрики и заводы, шахты, железные дороги. Размах строительства повлиял на развитие цементного производства. Строили предприятия рядом с богатыми природными месторождениями, неподалеку от водных и железнодорожных путей, от рынков сбыта продукции.

В России в 1857–1880 гг. производство цемента развивалось медленно, и лишь к концу 1890 г. выпуск цемента увеличивается. Во всей литературе по истории портландцемента говорится о том, что первый в России завод портландцемента был построен в г. Гродзеце, а на бочках с первым русским портландцементом было нанесено краской слово «Гродзец». Гродзец²⁰ — это деревня в Бендинском уезде Радомской губернии Царства Польского и Российской империи. Историки пишут, что в селе Славково той же Радомской губернии промышленник Иван Цеховский с 1853 г. производил из мергеля романцемент и присматривался к Гродзецу с его залежами известняка, глины и каменного угля — всего того, что необходимо для получения портландцемента. В 1856 г. он начал постройку в Гродзеце печей, а годом позже зажег в них огонь.

На гродзецком цементном заводе сырье смешивалось в пяти смесительных механических установках, а обжиг велся в 12 шахтных печах периодического действия.

²⁰ В настоящее время населенного пункта с таким названием не существует, можно лишь предположить, что деревня Гродзец находилась между современными городами Вроцлав и Краков.



- | | |
|--|--|
| <p>I¹ — использование слова «цемент» для обозначения раствора, гидравлической добавки и вяжущего вещества</p> <p>II¹ — производство естественного романцемента из английского сырья в России</p> <p>III¹ — запрет на экспорт «английского» цемента в Россию</p> <p>I² — получение патента на производство романцемента из мергелей</p> <p>II² — изобретение цементной вращающейся печи</p> <p>III² — начало производства портландцемента в Российской империи (г. Гродзец)</p> <p>IV² — создание цементного синдиката России</p> <p>I³ — разработка технологии производства и применения искусственного гидравлического цемента (портландцемента)</p> <p>II³ — появление многокамерных мельниц</p> <p>III³ — пуск первого цементного завода в границах современной России (г. Коломна)</p> <p>IV³ — необходимость расширения ассортимента цементов</p> | <p>I⁴ — разработаны первые русские нормы на портландцемент с методами определения его свойств</p> <p>II⁴ — отгрузка цемента в мешки</p> <p>III⁴ — развитие производства российского цемента — начало активного строительства в России сети железных дорог</p> <p>I⁵ — усовершенствование технологии производства цемента</p> <p>II⁵ — модернизация теплообменных печных устройств</p> <p>III⁵ — развитие и увеличение производства цемента на всей территории СССР</p> <p>IV⁵ — комплексное использование сырья, возможность утилизации отходов других отраслей промышленности</p> <p>I⁶ — введение обязательной сертификации цементов</p> <p>II⁶ — модернизация печных линий сухого способа производства</p> <p>III⁶ — начало возрождения цементной промышленности современной России</p> <p>IV⁶ — эколого-ориентированное развитие отрасли на основе НДТ — разработка ИТС 6 «Производство цемента»</p> |
|--|--|

Рис. 12.9. Эволюция технологий производства цемента

Таблица 12.1. Основные этапы технологических циклов развития производства цемента в России

Цикл	Научно-технический этап	Технико-экономический этап	Экономическо-социальный этап	Социально-регуляторный этап
Первый	Использование слова «цемент» для обозначения раствора, гидравлической добавки и вяжущего вещества. Первая половина XVIII в.	Производство естественного романцементы из английского сырья в России. 1839 г.	Запрет на экспорт «английского» цемента в Россию. 1852 г.	
Второй	Получение патента на производство романцементы из мергелей. 1796 г.	Изобретение цементной вращающейся печи. 1900 г.	Начало производства портландцементы в Российской империи (г. Гродзец). 1857 г.	Создание цементного синдиката России. 1914 г.
Третий	Разработка технологии производства и применения искусственного гидравлического цемента (портландцементы). 1825 г.	Появление многокамерных мельниц. 1910 г.	Пуск первого цементного завода в границах современной России (г. Коломна). 1870 г.	Необходимость расширения ассортимента цементы. Середина XX в.
Четвертый	Разработаны первые русские нормы на портландцемент с методами определения его свойств. 1881 г.	Отгрузка цементы в мешки. 1935 г.	Развитие производства российского цементы — начало активного строительства в России сети железных дорог. 1912–1914 гг.	
Пятый	Усовершенствование технологии производства цементы. Середина XX в.	Модернизация теплообменных печных устройств. Середина XX в.	Развитие и увеличение производства цементы на всей территории СССР. Середина XX в.	Комплексное использование сырья, возможность утилизации отходов других отраслей промышленности. Середина XX в.
Шестой	Введение обязательной сертификации цементы. 2017 г.	Модернизация печных линий сухого способа производства. Вторая половина XX в.	Начало возрождения цементной промышленности современной России. 2008 г.	Эколого-ориентированное развитие отрасли на основе НДТ — разработка ИТС 6 «Производство цементы». 2015 г.

Высокое качество сырья позволило получить хорошее качество портландцемента, который стали продавать не только в Польше, но и за рубежом — в Австрии и Пруссии. Но во внутренние губернии Российской империи гродзецкий цемент почти не поступал — доставлять цемент с этого завода в центральные губернии Российской империи было невыгодно. Этому препятствовало отсутствие удобных путей сообщения, а также сказывалась конкуренция цемента английского. Потребности русского военного ведомства, как и прежде, покрывались за счет ввоза цемента из-за границы.

К тому времени англичане уже утратили свою монополию на производство портландского цемента, но их позиции на мировом портландцементном рынке еще были очень сильны. В России, в частности, упорно продолжали предпочитать английский цемент всякому другому, в том числе и отечественному.

Вот что гласил один из пунктов Технических условий (Урочных положений²¹) на сооружение опор Мстинского моста Николаевской (ныне Октябрьской) железной дороги из Петербурга в Москву: «Портландцемент должен быть английский. Разрешается и русский, или другой, но при условии, если он не будет хуже английского». Приведенные Технические условия были составлены в 1875 г., когда в стране, помимо гродзецкого, работало уже четыре завода по производству портландцемента. И составлены они были не каким-либо случайным покупателем, а железнодорожным ведомством — крупнейшим в ту пору потребителем цемента: вся сеть железных дорог была построена на цементе.

Производство российского цемента началось только после начала строительства в России сети железных дорог. Правительство и инвесторы вкладывали в сооружение путей и сооружений значительные средства и хотели как можно скорее получать от них практическую пользу и отдачу. А ничего лучше бетона для быстрого строительства на тот момент не существовало. К делу были привлечены корифеи-химики А. Р. Шуляченко в Санкт-Петербурге и В. П. Ливен²² в Дерпте.

Главным инициатором создания заводов, работавших на научной базе, стал рижский предприниматель К. Х. Шмидт²³, который использовал работы доктора химии В. П. Ливена, проводившего исследования составов цементных материалов. Научная подготовка Ливена обеспечила производство высококачественного портландцемента, который по своим свойствам был абсолютно одинаков на всех построенных им крупнейших заводах по производству цемента в России — при этом исходные материалы от разных поставщиков были совершенно разными.

В 1866 г. Ливен построил завод по производству портландцемента «Товарищество Рижского цементного завода и маслобойни К. Х. Шмидта» на балтийской морской границе — в Подере близ Риги и спроектировал в 1870 г. завод в Порт-Кунде (Эстония). Выпуск цемента на фабрике начался в 1871 г.

В границах современной России первым цементным заводом является Щуровский. Щуровский цементный завод был основан в 1870 г. в пригороде города (на правом берегу Оки, недалеко от Коломны) купцом 1-й гильдии Эмилем Александровичем Липгартом, который и стал первым его владельцем.

²¹ Урочное положение — сборник правил, «касающихся всякого рода строительных работ», — состояло из 19 отделений и 712 параграфов. Для различных строительных работ было разработано Урочное положение, изданное в законодательном порядке в 1843 г., затем пересмотренное в 1869 г. и вновь подвергнутое исправлениям в 1883 г.

²² Виктор Павлович Ливен — доктор химии, окончил Юрьевский (Дерптский) Императорский университет (в настоящее время — Тартуский университет в Эстонии). Его имя связано со строительством цементных заводов, в первую очередь заводов под Новороссийском.

²³ Карл Христиан Шмидт — купец и фабрикант, основатель «Товарищества Рижского цементного завода и маслобойни К. Х. Шмидта» (г. Рига), «Новотихвинского завода огнеупорных изделий» (Шугозерское сельское поселение, Тихвинского района Ленинградской обл.).

Приобретение и открытие цементного завода обуславливалось большим сырьевым запасом известняка, песка и гравия, которым располагала эта местность, что идеально подходило для организации доставки продукции несколькими способами: водным путем (по Оке и Москве-реке) и по железной дороге, пролегающей рядом.

Благотворное сотрудничество с ведущими заводами положительно способствовало развитию, и скоро небольшой цех по производству цемента перерос в крупную фабрику со значительным объемом изготавливаемой продукции.

Организованное товарищество «Эмиль Липгарт и К^о» построило в селе Щурово известняковый и цементный заводы (рис. 12.10), на которых постоянно работали 900 человек. На заводе действовала одна паровая машина мощностью 50 лошадиных сил. Завод выделял цемента 18 400 бочек по 7 руб., 1 433 000 пудов извести и 370 000 пудов алебастра. Известь и глина местных разработок, а алебастр — из Владимирской губ. Оборот — 519 000 руб.²⁴ На заводе было занято 700 рабочих. При заводе находились больница и школа.

Под золотым дождем от железнодорожных и строительных подрядчиков цементная промышленность начала расти как на дрожжах. По всем городам и весям шел поиск подходящих мест для строительства цементных заводов.

В 1871 г. Александр Александрович Пороховщиков²⁵ выкупил землю (примерно 36 га) у деревни Выползово Добрянтинской волости Подольского уезда, на левом берегу Пахры, недалеко от железнодорожного моста через реку, имевшую залежи известняка, у городского головы Ф. С. Добротворского и приступил в качестве подрядчика к строительству заводов на свой капитал и капитал П. И. Губонина. В 1875 г. после окончания строительства цементной фабрики и кирпичного завода компания «Губонин, Пороховщиков и К^о» преобразовалась в «Московское Акционерное Общество для производства цемента и других строительных материалов и торговли ими» и выпустила свои акции.

Таким образом, в России на базе нескольких цементных заводов Подольского уезда, ранее выпускавших романцемент, был создан цементный завод Московского Акционерного Общества (рис. 12.11).

Спустя 12 лет после основания первых поселений в Зацемесской стороне (1869) на пригородных территориях стали строиться первые промышленные предприятия — заводы. Строили их иностранцы. Во второй половине 70-х гг. XIX в. в Маркотхских горах, простирающихся вдоль северо-восточного берега Цемесской бухты, был обнаружен мергель — сырье для цемента. Запасы его оказались огромными, качество — редчайшим. Первый цементный завод в районе г. Новороссийска под названием «Общество Черноморского цементного производства» был построен по указу государя императора Александра III в 1882 г. по чертежам и при непосредственном участии В. П. Ливена (рис. 12.12). К концу 1883 г. цементный завод выпустил 46 000 бочек цемента, большая часть которого также отправилась за границу.

Вслед за ним в 1898 г. был введен в действие второй завод, получивший название «Цепь». Поскольку потребность в цементе постоянно увеличивалась, темпы строительства заводов все более нарастали.

²⁴ Справочник «Сельские фабрики и заводы Рязанской губернии в XVIII–XIX вв.».

²⁵ Александр Александрович Пороховщиков (1833–1918) — русский предприниматель, строитель, публицист, меценат, общественный деятель. В 1865 г. в качестве подрядчика, строителя и вкладчика выполнил работы по переустройству ряда правительственных учреждений в Москве. С 1873 г. впервые стал мостить улицы твердыми породами камня — диабазом и диоритом, широко использовал для покрытия улиц асфальт. Принимал участие в строительстве храма Христа Спасителя в качестве архитектора и вкладчика средств. Построенный в 1871–1872 гг. для Пороховщикова дом в Староконюшенном переулке (архитектор А. Л. Гун) является памятником истории и культуры народов РФ регионального значения. Известный актер и режиссер, народный артист России Александр Шалвович Пороховщиков являлся внуком мецената по материнской линии.



Рис. 12.10. Товарищество «Эмиль Липгарт и К°»



Рис. 12.11. Цементный завод Московского акционерного общества

К 1912 г. были построены цементные заводы «Солнце», «Бетон», «Титан», «Скала», «Победа», «Орел», «Атлас». К 1917 г. в Новороссийске и его окрестностях действовало уже десять цементных заводов. Все они были оснащены примитивными шахтными печами конструкции фирмы Дитча (Dietzsch), в которых обжигались натуральные мергели.



Рис. 12.12. Общество Черноморского цементного производства

Все заводы были небольшими, малопродуктивными. Со временем они старели, выходили из строя, одни разрушались, другие постепенно заменялись новыми, более мощными.

Несмотря на все трудности, выпуск цемента увеличивался год от года. Цементные заводы появлялись один за другим, и уже к 1897 г. по производству цемента Россия вышла на третье место в мире. Не радовало третье место в общемировом рейтинге и отечественных исследователей рынка.

Один из самых авторитетных из них, С. А. Монковский, писал: «В общем, производительность всей России не превышала в лучшие годы 5 млн пуд. Число действовавших заводов не превосходило 34. Если сравнить эти цифры с производительностью соседней Германии, в которой к 31 декабря 1906 г. в состав общества немецких цементных фабрикантов входило 87 фабрик с производительностью в 26 750 000 бочек, то уже это сопоставление абсолютных цифр производства наводит на мысль о том, что в России поле для развития цементного дела еще весьма обширно. Этот вывод находит себе более разительное подтверждение, если сравнить не абсолютные цифры, а относительные: соотношение производств на одного жителя. При 60 миллионах населения в Германии 26 млн бочек дают почти полбочки на человека, тогда как в России 5 млн бочек при 150 млн ее населения дают только 1/30 часть бочки на человека, т. е. в 15 раз меньше».

В конце XIX в. в Вольске строятся первые в Поволжье цементные заводы. Окрестности этого города совместили в себе уникальное сочетание условий для развития цементной промышленности. Огромные залежи прекрасного, без вредных примесей сырья (мел, глина) сочетались с наличием водного (река Волга) и железнодорожного (железнодорожная ветка Аткарск — Вольск была построена в 1895 г.) путей сообщения, делавших возможной доставку топлива и отправку готовой продукции практически во все концы страны.

В результате в Вольске с 1897 по 1914 г. было построено четыре цементных завода.

Первыми были пущены в строй в 1897 г. завод «Санкт-Петербургского товарищества для производства Глухоозерского портландцемента и других строительных материалов» (впоследствии его переименовали в завод «Большевик»). Спустя еще четыре года, в 1900 г.,

купец Плигин построил завод «Железо-Цемент», который потом перекупил Зейферт (затем — завод «Красный октябрь»), от закладки до пуска завода проходило не более 18 месяцев.

В первую очередь пускались печи по обжигу сырья и цементные мельницы, потом достраивались остальные цеха и сооружения с использованием своего цемента. На время пуска оба цементных завода были оснащены шахтными печами системы Дитча и Либана, самыми совершенными в то время в России. В первые годы существования предприятий производство расширялось за счет строительства новых печей тех же конструкций.

Благодаря высокому качеству сырья и новым технологиям вольские цементные заводы выпускали портландцемент наивысшего качества, которое намного превосходило требования технических условий приемки данной продукции, утвержденных министром путей сообщения. Продукция вольских заводов неоднократно удостаивалась наград на Всероссийских промышленных выставках.

Это обстоятельство, а также фактически монопольное положение на юго-восточных рынках России дало им возможность расширять производство и наращивать выпуск продукции, при существенном снижении ее себестоимости, даже в годы кризиса и депрессии начала XX в. В то время, когда многие из российских цементных заводов закрылись (в 1907 г. не работало 14 из 38 заводов), а другие работали с минимальной нагрузкой, производство цемента на вольских заводах в 1901–1908 гг. выросло с 3,2 до 5,3 млн пудов. Выработка на одного рабочего поднялась на 33%. Себестоимость пуда цемента снизилась с 38 до 22,6 копеек, при обычной продажной цене с завода 37–39 копеек. В 1908 г. в Вольске вырабатывалось 13,4% российского цемента. По количеству производимого цемента Вольск стоял на третьем месте в России после 1-й Черноморской и Донской групп заводов.

Оживление экономики после 1909 г. вызвало новое промышленное строительство и увеличение спроса на строительные материалы, что послужило очередным толчком к модернизации производства. С этого времени на вольских цементных заводах началась глобальная реконструкция: устанавливались вращающиеся печи с непрерывным циклом производства, значительно возросла энерговооруженность заводов.

«К последнему времени, — писал А. Крупский о смене типа печей на заводах, — все стали переходить или собираться к переходу вместо стоячих проходных шахт к вращающимся лежачим, введенным, как известно, по почину Америки и распространенным в Европе известнейшими строителями Ф. Л. Смиidt в Копенгагене, Полизиус в Дессау (который ставил первые в России вращающиеся печи для завода в Баку на нефтяном топливе) и другими германскими фирмами».

Конкуренция за эти заказы была довольно жесткой, фирма «Ф. Л. Смиidt» сумела получить несколько крупных и важных заказов. Ее печи и оборудование получили заводы в Новороссийске, Подмоскowie, Петербурге, Рязанской и Калужской губерниях.

Усовершенствование производства позволило за три года вдвое увеличить выпуск цемента. В 1912 г., по данным Министерства торговли и промышленности, вольские заводы произвели 10,9 млн пудов цемента из 95,1 млн пудов цемента, изготовленного в целом по стране.

В 1912–1914 гг. в окрестностях Вольска были построены и пущены в строй еще два цементных завода. Владельцами их были С.-Петербургское акционерное общество «Ассерин» и «Саратовское акционерное общество по производству портландцемента». Пайщиками последнего состояли известнейшие саратовские мукомолы — Ф. П. Шмиidt, О. П. Шмиidt, В. А. Колесников, М. Ф. Волков и другие, а основной капитал выражался в сумме 1,5 млн рублей.

Тремя источниками и тремя составными частями цементных заводов были близкие подъездные пути, залежи топлива и залежи мела и глины. Эти заводы были значительно меньше первых, но, оснащенные с учетом новейших достижений техники, могли производить соответственно от 4 до 6 млн пудов цемента в год. Производство завода «Ассерин», например, было подчинено принципу конвейера, что являлось новейшим достижением

в цементной промышленности того времени. Все цеха его — от карьера до погрузки — были вытянуты в одну линию, и сырье проходило минимальное расстояние до конечного продукта. Данное обстоятельство давало возможность значительно уменьшить число подсобных рабочих, занятых в производстве и погрузке цемента, что в свою очередь сокращало его себестоимость.

С 1916 г. до 75% цемента вольских заводов шло на военные нужды. В это время на заводе активно использовался труд военнопленных австрийцев. На начало 1916 г. на 216 рабочих производственных цехов (карьер, мельница, вращающиеся печи) завода Зейферта было 102 военнопленных.

Производительность завода практически не снижалась до конца 1917 г.

В 1899 г. у деревни Боровка Калужской губернии (ныне город Фокино Брянской области) был основан Мальцовский цементный завод. Рядом находились богатейшие залежи мела и глины, потому выбор и пал на это место. Портландцемент изготавливали по способу, который в 1890 г. предложил шведский инженер Бергрюн. Суть его заключалась в смешивании сырых материалов, т. е. мела и глины, в «состояние их натуральной влажности, без предварительного высушивания, прямо в тесто».

Завод (вскоре после его пуска) посетил профессор А. Р. Шуляченко, которого называют «отцом русской цементной промышленности». В статье, опубликованной в 1901 г. в журнале «Цемент, его производство и применение», он так писал: «Нашелся русский техник Шешминцев, который не только понял всю важность идеи Бергрюна, но и решился осуществить ее в обширных размерах. Он имел смелость основать товарищество для выработки портландцемента по новому способу, применив для смешивания сырых материалов идею Бергрюна, но в совершенно самостоятельной обработке. Мел и глина смешиваются без предварительного высушивания, с природным содержанием 25–30%-ной влажности».

Цемент поставляли в Москву, Московскую, Тверскую, Новгородскую, Ярославскую, Владимирскую, Нижегородскую, Симбирскую и другие губернии, прилегающие к левому берегу Волги, в бочках вместимостью по 10 пудов каждая. Успешному сбыту цемента в немалой степени способствовало то обстоятельство, что завод был сооружен на оживленном перекрестке железнодорожных и водных артерий в Европейской части России. За 1900–1909 гг. предприятие выпустило 28 млн пудов цемента, который поставлялся крупнейшим строительным сооружениям по всей России.

В 1909 г. правление завода начало переговоры с датской фирмой Смида об установке вращающихся печей, позволяющих выпускать цемент высокого качества. К концу года на заводе были установлены две вращающиеся печи длиной 47 м каждая, являвшиеся последним словом цементной техники. Это были самые длинные вращающиеся печи в России, превосходившие по длине знаменитую печь Эдисона²⁶ в Америке.

²⁶ Томас Алва Эдисон (11.02.1847–18.10.1931) — всемирно известный американский изобретатель и предприниматель, получил 1093 патента в США и около 3 тыс. в других странах мира. В 1901 г. в Стьюартсвилле Эдисон устроил большую фабрику портландского цемента. В области производства портландцемента Эдисон изобрел особые весы, которые с помощью специальной электрической сигнализации автоматически отвешивали равные количества смеси для загрузки печей. Важнейшим нововведением явилась «длинная печь» — более 40 м длиной и с большим диаметром. Производительность новой печи примерно в пять раз превышала производительность ранее применявшихся печей, и при этом цемент получался более высокого качества. За период с 1905 по 1924 г. производство цемента на заводе Эдисона выросло с 3000 до 7500 бочек в день. В это же время у Эдисона возникает новый оригинальный план — способ быстрого серийного производства домов: из цемента должны отливаться целые дома. Наряду с понижением материальных расходов это может дать огромную экономию времени. И в лаборатории Эдисона были разработаны модели таких домов и сметы расходов: самый дорогой дом из цемента должен быть стоимостью 12 тыс., самый дешевый — 500 долларов. Однако, несмотря на то, что Эдисон с особенной энергией пропагандировал эту новую идею, он не мог обеспечить полного успеха своим литым домам из цемента.

Накануне Первой мировой войны предприятие было оснащено по последнему слову техники того времени. На нем функционировали 18 шахтных и 5 вращающихся печей общей годовой мощностью до 1 млн 375 тыс. бочек цемента в год.

Высокий уровень концентрации производства при растущем спросе на продукцию создал условия для монополистических соглашений крупных цементных фирм еще в самом начале XX в. В 1914 г. «Ассерин» и «Железо-Цемент» совместно с «Обществом Черноморского цементного производства», «Обществом мальцевских заводов» и товариществом «Э. Липгарт и К^о» вошли в цементный синдикат России.

История Воскресенского цементного завода начиналась более ста лет назад. В конце XIX в. в России появляются первые вращающиеся печи для производства высококачественного цемента. Бурное развитие промышленности и строительство новых заводов требует все больше цемента. В 1910–1911 гг. в бывшем Коломенском уезде Борис Митрофанович Сериков и Эрнест Эмильевич Рингель покупают у помещика Смирнова участок земли общей площадью чуть более 60 га. Здесь были обнаружены большие залежи сырья для производства цемента.

Так возникает идея строительства на этом месте цементного завода. Строительство цементного завода потребовало больших капиталовложений. Такое промышленное предприятие, объединявшее все стадии производства — от добычи сырья до выпуска готовой продукции, — не могло обойтись без применения мощных механизмов и силовых установок, без запасов топлива, наличия транспорта и квалифицированных кадров. Заручившись поддержкой надежных компаньонов, Б. М. Сериков основывает акционерное общество по производству цемента и заключает договор с датской фирмой «Смидт» на проектирование, поставку оборудования и строительство завода.

Осенью и весной 1911–1912 гг. шла подготовка к строительству завода. На лошадях местные крестьяне завозили строительные материалы: песок, белый камень, щебень, кирпич. Все металлические части будущих зданий и сооружений в разобранном виде поставлялись московским заводом «Гужон». Сборка и клепка всех металлических конструкций проводилась на месте (в то время сварочных работ не было). От станции Воскресенск до строительной площадки завода была проложена железная дорога, по которой доставлялись грузы. Одновременно со строительством завода возводились хозяйственные и жилищные постройки. Всего в строительстве участвовало около 2500 человек. При полном отсутствии механизации все здания, как основного производства, так и вспомогательных цехов, с установкой оборудования были построены в течение одного года. Строительством и монтажом всего оборудования руководили датчане. Согласно современной терминологии производство было спроектировано на две технологические линии с резервом на третью линию.

Ноябрь 1913 г. — точка отсчета в истории Воскресенского цементного завода. Предприятие введено в эксплуатацию.

В России цементные заводы появлялись один за другим, производство цемента неуклонно росло. Причем этот результат стоил довольно дешево владельцам фирм потому, что оплата труда рабочих была минимальной, а условия работы — нечеловеческими.

Капиталистов мало интересовало положение рабочих. Всюду на заводе господствовал ручной труд (рис. 12.13). Обжиг клинкера велся в шахтных печах. Погрузка извести в вагоны производилась вручную, на носилках. Тяжелые бочки с цементом раскачивали на руках и под «эх, ухнем» грузили в вагоны.

Карьер был самостоятельным участком (рис. 12.14). Весной и осенью карьер Щуровского завода затапливало водой, поэтому работали здесь только летом, когда спадал паводок. Орудием труда бутолома в карьере служили кувалда и кайло (курка).

Не лучше обстояло дело и на других заводах. На новороссийском карьере велась разработка только натуральных мергелей, а остальная масса камня шла в отвал. Карьер занимал в то время большую территорию, поэтому все быстрее удалялся от заводов, усложнялась транспортировка сырья к мельницам (рис. 12.15).



Рис. 12.13. Ручной труд

В забое работали по 3–4 человека. За вагонетку камней хозяева платили копейки, а землю, которой набиралось немало, грузили и вывозили в отвал бесплатно. Рукавицы, ведра для питьевой воды — все покупали за свои деньги.



Рис. 12.14. Карьер Шуровского цементного завода. Так раньше добывали известняк. Бутолом — прежде основная профессия в карьере

Ломщики камня работали по 12 часов, а зимой — от восхода солнца до заката. Работа не прекращалась ни в жару, ни при пронизывающих норд-остах. Сырье добывали ломом, киркой, лопатой. Дневная норма — каждому ломщику наколоть и погрузить в вагонетки по 1200 пудов камня (это около 20 т).

Не легче было и тем, кто трудился у шахтных печей. Один из старых рабочих вспоминал о работе шахтной печи периодического действия (1892): «Это была цилиндрическая шахта, отфутерованная шамотным кирпичом. Мергель дробили до размера больших яблок. Загружали печь вручную при температуре в ней 70°С. Грузчик внутри печи принимал бадьи с сырьем и углем, рассыпал и разгребал по сечению печи слоями. Печь разжигалась дровами, “прогорала” за трое с половиной суток, производительность ее была около двух бочек в час. Когда горение в печи кончалось, обжигальщики приступали к выгрузке клинкера. Если он спекся, эту массу разбивали штангами. При этом рабочего подстерегала опасность получения ожога

от раскаленных кусков клинкера. Неостывший шахтный клинкер рабочие вывозили большими многопудовыми вагонетками, порой впрягаясь в лямки вместо лошадей. Люди часто получали серьезные увечья, тогда их выбрасывали за ворота завода без куска хлеба».



Рис. 12.15. Добыча мергеля в карьере ручным способом, 1929 г.

Рабочий вольского завода Г. Я. Лысов вспоминал о работе у печей, спекавших исходные материалы в клинкер: «Корпус печей был закупорен, как пробкой, не разрешалось раскрывать дверей, чтобы не охладить печи. Рабочий был изнурен от жара, от цементной и угольной пыли. Были случаи, когда людей выносили замертво. Обжигалы во время работы не имели ни минуты отдыха. На площадках, если плеснуть воду — она закипала, на голове трещали волосы. Обувь не терпела. К валяным обрезкам, чтобы не сжечь ноги, привязывали верблюжьи погоны».

Измельчение клинкера производилось на щековых дробилках Блека, в которых можно получить 5000 кг за час кусков размером 40–50 мм. Для размолы цемента служили мельницы с жерновами, подобными употребляемым для хлеба, или такие, где размол (истирание) производится при посредстве тяжелых шаров (мельница Мореля), или, наконец, как в Соединенных Штатах мельница Гриффина, где есть жернов, укрепленный на наклонной (почти вертикальной) оси, катящейся по внутренней поверхности кольцеобразного бака (дробление материала совмещается с истиранием).

Наглядное представление о «ручном» производстве цемента дают экспонаты музея цемента г. Новороссийска (рис. 12.16).

Произведенный цемент, как было сказано выше, упаковывался в бочки, на которые ставился товарный знак завода-изготовителя (рис. 12.17, а). Например, в 2013 г. на аукцион был выставлен жетон «Товарищества Рижского цементного завода и маслобойни К. Х. Шмидта», выпущенный в память о миллионной бочке цемента (жетон размером 35,5 × 24,2 мм, выполнен из золота и эмали (рис. 12.17, б).

Интересно, что до 1935–1936 гг. цемент перевозился в деревянных бочках. При заводах были большие бондарные промыслы, для которых завозили десятки тысяч кубометров леса. А в 1935 г. началась планомерная работа по изменению правил отгрузки цемента. Теперь цемент отгружался в бумажных мешках. Для погрузки на суда и в вагоны были установлены ленточные транспортеры.



Рис. 12.16. «Цеха» обжига (а) и помола (б) цементного клинкера. Экспозиции из Музея цемента г. Новороссийска



Рис. 12.17. а) бочка с цементом из новороссийского музея цемента, на бочке надпись: «Акц. Общ. Новороссийского завода портландского цемента "Цепь"»; б) жетон «Товарищества Рижского цементного завода и маслобойни К. Х. Шмидта», на жетоне надпись: «Алексей Михайлович Повалишин²⁷. 1868. В память миллионной бочки выработки цемента. 1884»; в) погрузка цемента на судно

²⁷ Алексей Михайлович Повалишин (1837–1904) — горный инженер, управляющий Уральской железной дорогой.

Таким образом, отечественная цементная промышленность развивалась скачкообразно и неравномерно. Это, однако, способствовало тому, что рост цементной промышленности сопровождался непрерывным улучшением технологии производства и увеличением мощности оборудования. Так, если на первом заводе портландцемента обжиг сырья производился в простых шахтных печах высотой до 5 м, то завод портландцемента И. И. Цехановского смешивал сырье в пяти смесительных механических установках, а обжиг велся в 12 шахтных печах периодического действия.

К концу XIX в. русская цементная промышленность полностью удовлетворяла потребности строительства в цементе. Качество русского портландцемента было высокое. Каждый завод имел лабораторию и контролировал продукцию. Кроме того, заводы предоставляли образцы цементов для испытания хорошо оборудованным лабораториям ведомств. Так, химический состав цемента завода П. Е. Роше был проверен в 1862 г. лабораторией горного ведомства в Петербурге. Цемент этого же завода испытывал и А. Р. Шуляченко в 1869 г.

По инициативе владельцев цементных заводов в 1885 г. были организованы съезды цементной промышленности. Работами съездов руководил вначале А. Р. Шуляченко, а затем Н. А. Белелюбский.

На съездах решались основные научные, технические и организационные вопросы цементного производства. На одном из съездов, в 90-х гг., А. Р. Шуляченко говорил: «Русский портландцемент по своим качествам несколько не уступает заграничному лучшим маркам. Будем стараться удешевить производство его, и мы окончательно вытесним с нашего рынка заграничный товар».

Первые технические условия на приемку и поставку портландских цементов были составлены Н. А. Белелюбским и А. Р. Шуляченко. В 1881 г. эти условия были утверждены.

Постепенно ввоз заграничного цемента стал сокращаться. Этому отчасти способствовало распоряжение директора департамента железных дорог Д. И. Журавского о том, чтобы для железнодорожных работ принимался цемент только русского производства.

Российские инженеры-цементники преодолевают сопротивление Министерства путей сообщения и внедряют в строительство наш цемент. А. Р. Шуляченко, Н. А. Белелюбский издают первый в России журнал «Цемент», руководят строящимися цементными заводами, предлагают первые стандарты для сравнения свойств цементов, выпускаемых отечественными заводами. Шуляченко и Белелюбский были видными мостостроителями, по их проектам и под их непосредственным руководством были построены мосты через Волгу, вблизи Сызрани, и через Неву (Литейный мост) в Петербурге.

Цемент начинают широко применять для гидротехнических сооружений, дамб, плотин. Но через 20–30 лет службы в гидротехнических сооружениях появляются первые признаки коррозии цементного бетона. Научное объяснение коррозии было дано после изучения состава затвердевшего и корродированного цемента. Наиболее полно эти работы выполнены русскими учеными С. И. Дружининым, А. А. Байковым, В. А. Киндом. Проблема была решена путем введения пуццолановых добавок.

В 1908 г. был изобретен глиноземистый цемент, отличающийся быстрым темпом роста механической прочности. Впервые этот цемент начали производить во Франции, но способ производства держали в секрете. Французы использовали глиноземистый цемент для восстановительных работ: возведение разрушенных мостов, оборонительных укреплений.

В 1916 г. из 58 заводов портландцемента шахтные печи имелись на 25 предприятиях. Эти печи были уже достаточно сложными сооружениями. Каждая обеспечивала выпуск цемента от 20 до 30 т в сутки. Двадцать два завода имели вращающиеся печи с суточным выпуском клинкера до 40–60 т каждая. Одиннадцать заводов были оборудованы печами обоих типов. Всего в России в 1914 г. имелось 160 шахтных и 50 вращающихся печей.

Имея новейшую технику цементного производства конца XIX и начала XX в., а также совершенную технологию выработки цемента, Россия в 1898–1900 и 1913–1914 гг. занимала третье место в Европе по производству цемента.

В годы Гражданской войны производство цемента резко снизилось. Заводы остановились, часть их была разрушена. Основное электрооборудование, двигатели, компрессоры, оборудование электростанций снимались и отправлялись в неизвестном направлении. Заводы не работали из-за отсутствия топлива, энергии, разрухи на железных дорогах.

После Октябрьской революции развитию цементной науки уделялось большое внимание, так как цементная промышленность является базовой в обеспечении экономической мощи страны. Была создана научная основа цементной промышленности — по всей стране были созданы организации, занимающиеся проблемами и перспективами развития производства цемента.

К 1927–1928 гг. выпуск цемента в России поднялся на довоенный уровень. Клинкер преимущественно получали в шахтных печах периодического и непрерывного действия, условия труда рабочих были исключительно тяжелыми. Первые вращающиеся печи, изготовленные на Макеевском машиностроительном заводе, длиной 25 м и диаметром 1,8 м в России появились в 1909 г.

В годы первых пятилеток построено 15 новых цементных заводов. В 1940 г. было выпущено 5,7 млн т цемента. Были построены два завода на востоке страны.

После окончания Великой Отечественной войны восстановление цементных заводов развивается быстрыми темпами. К 1966 г. построены заводы Савинский, Алексеевский, Старооскольский, Топкинский, Катав-Ивановский, Каменец-Подольский. 1966–1975 гг. — период развития и совершенствования цементной промышленности. Была создана научная основа цементной промышленности — по всей стране создавались организации, занимающиеся проблемами и перспективами развития производства цемента. Созданы проектные и исследовательские институты: Гипроцемент, НИИцемент, Южгипроцемент. Организован выпуск специальных видов цемента: сульфатостойкого, белого и декоративного, тампонажных цементов, дорожного и расширяющихся.

Уже в 1962 г. СССР занял первое место в мире по выпуску цемента. В 1971 г. выпуск цемента в стране превысил 100 млн т. Цементная промышленность СССР отличалась высокой концентрацией производства. Средняя мощность цементного завода в СССР была почти в два раза выше, чем в США, и на 30% выше, чем в Японии.

С 1990 по 1995 г. наблюдался спад производства, промышленность находилась в кризисном состоянии. Оснащенность цементной промышленности России оставалась устаревшей. Уровень производства снизился до 50%. В связи с резким спадом спроса на цемент заводы вынуждены были приостанавливать и выводить из эксплуатации технологические линии.

Все заводы, введенные в эксплуатацию до 1990 г., имеют высокий износ основных фондов и в последние 25 лет практически не подвергались реконструкции и внедрению процессов по интенсификации производства и наращиванию мощности. Из общего количества цементных заводов сухого способа производства, введенных в эксплуатацию до 1990 г., только два завода — АО «Невьянский цементник» и АО «Спасскцемент» — можно считать отвечающими современному техническому уровню.

За период начиная с 1988 до 2008 г. новые мощности по выпуску цемента не вводились, но выведено из эксплуатации семь цементных заводов, в том числе три — сухого способа производства.

С 2008 г. началась беспрецедентная активность в строительстве и вводе в эксплуатацию новых современных линий, преимущественно сухого способа производства. В 2008–2017 гг. введено в эксплуатацию 26 технологических линий общей мощностью 36 млн т, из них 24 технологических линии, работающие по сухой технологии, и одна линия комбинированного способа производства. Кроме того, куплено, но не смонтировано еще семь современных технологических линий мощностью 15 млн т.

В настоящее время по сравнению с 1990 г. в составе технологического оборудования произошли существенные изменения, прежде всего за счет ввода линий сухого способа и вывода из эксплуатации малоэффективных, морально и физически изношенных линий, оснащенных шахтными печами и устаревшими короткими линиями мокрого и сухого способа производства.

Большинство линий мокрого способа производства были подвергнуты реконструкции, находятся в эксплуатации и являются наиболее эффективными для линий мокрого способа производства. Однако в эксплуатации продолжают также оставаться физически и морально устаревшие технологические линии мокрого способа производства длиной до 100 м.

За более чем столетнюю историю цемента существенно поменялось производство (рис. 12.18–12.21). Современные цементные заводы полностью автоматизированы, здесь больше нет ручного труда — в карьерах работают «умные машины», производство оснащено современными мельницами и печными установками.

Одновременно с совершенствованием технологии производства расширялся и ассортимент выпускаемых вяжущих материалов. Еще в начале века для строительства подземных и гидротехнических сооружений начали применять пуццолановый портландцемент с повышенной водостойкостью.

Развитие металлургии дало цементной промышленности возможность использовать для изготовления шлакопортландцемента и других видов шлаковых вяжущих доменные шлаки.

В разработку этих видов цемента большой вклад внесли ученые А. Р. Шуляченко, И. А. Белелюбский, А. А. Байков, С. И. Дружинин, а затем В. А. Кинд, В. Н. Юнг, П. П. Будников, Ю. М. Бутт, С. Д. Окороков, Н. А. Торопов, С. М. Рояк, В. В. Тимашев и другие.

Производство многокомпонентных цемента в наши дни приобрело важное значение, поскольку это простой и надежный путь экономии топливно-энергетических ресурсов. Современная строительная техника предъявляет к вяжущим материалам новые высокие требования. Для производства железобетонных изделий и конструкций нужны быстротвердеющие портландцементы; для сооружения бетонных дорог — цемент, обладающий повышенной деформативной способностью и морозостойкостью, для декоративных целей требуются белые и цветные цементы, а для ремонтных работ — расширяющиеся цементы. В соответствии с запросами строительства советскими учеными П. И. Боженковым, П. П. Гайджуровым, Л. Д. Ершовым, И. В. Кравченко, Т. В. Кузнецовой, В. В. Михайловым, В. В. Тимашевым, М. И. Хигеровичем и другими разработана технология производства соответствующих специальных цемента. Их ассортимент постоянно расширяется.

Последние годы недостаточного внимания к цементной науке привели к тому, что утеряно как минимум 75% научного потенциала отрасли. Оставшиеся 25% нуждаются в инвестициях со стороны производителей и поддержке со стороны государства.

ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА ЦЕМЕНТА

Цемент — это гидравлическое вяжущее вещество, получаемое тонким измельчением портландцементного клинкера с гипсом и добавками, образующее при затворении водой удобоукладываемое тесто, способное затвердевать в воде и на воздухе.

Производство цемента включает две ступени: первая — получение клинкера, вторая — доведение клинкера до порошкообразного состояния с добавлением к нему гипса или других добавок (рис. 12.22).

Для производства цементного клинкера в России в качестве основного сырьевого компонента используются природные известняк, мел, мергель и другие карбонатсодержащие материалы, включающие отходы смежных производств. В качестве глинистого компонента используются природные глины, вскрышные глинистые материалы, глинистые сланцы, шлаки, золошлаковые отходы и т. п. (в общей сложности более 40 наименований). Для корректировки сырьевой смеси применяется ряд техногенных железосодержащих материалов — колчеданные огарки, пыль и шламы газоочистных сооружений черной металлургии, конвертерных шлаков, шламбрикетов и другие железосодержащие материалы. Доля природных ресурсов в сырьевой смеси при производстве клинкера составляет около 70%. Кроме того, в качестве активных минеральных добавок также применяются техногенные отходы черной и цветной металлургии, золошлаковые отходы ТЭС, сульфатсодержащие, горелые пески и формовочные смеси (около 20 наименований).

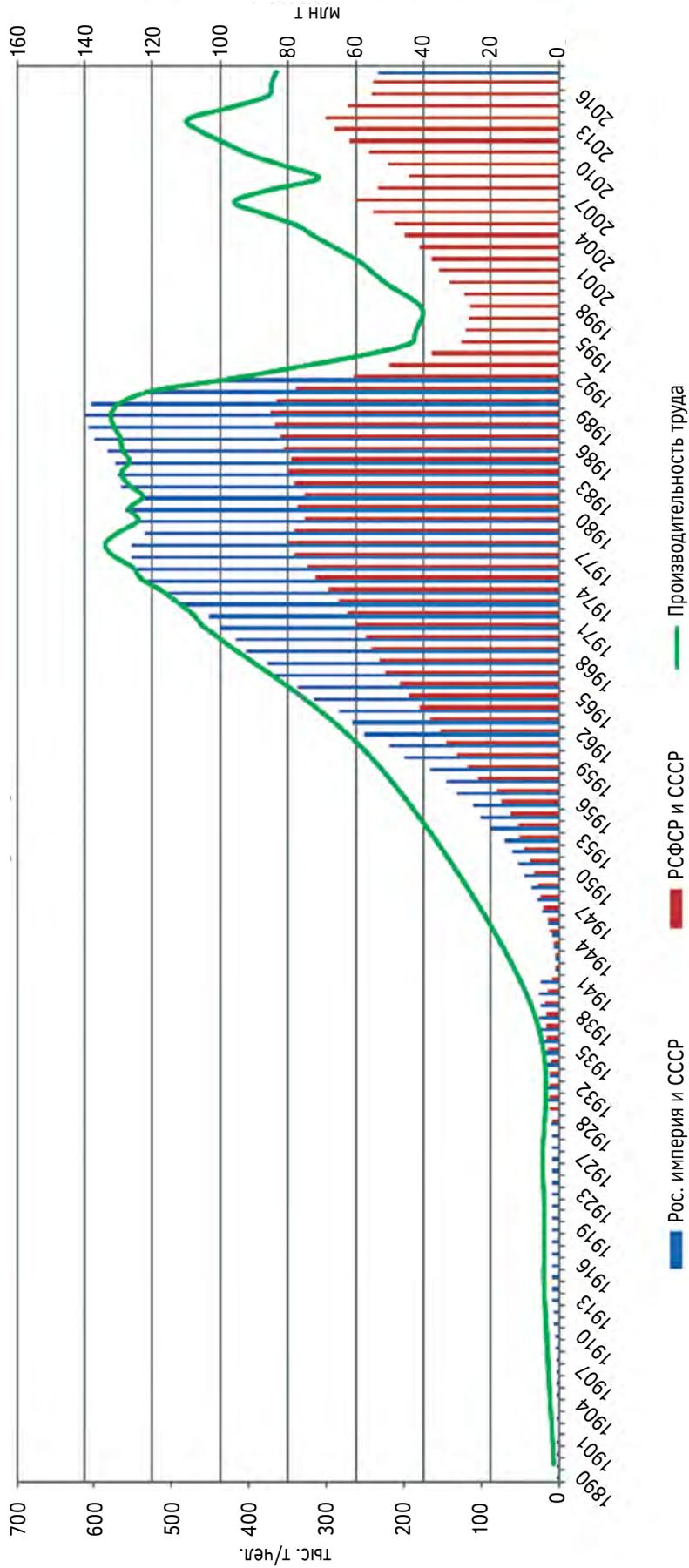


Рис. 12.18. Выпуск цемента по годам, начиная с XIX в.



Рис. 12.19. «Верхнебаканский цементный завод» возведен на месте построенного по указу государя императора Александра III в 1882 г. «Общества Черноморского цементного производства»



Рис. 12.20. На современном заводе сухого способа производства



Рис. 12.21. Новая линия по производству цемента по «сухому» способу на ОАО «Холсим (Рус) СМ» (г. Коломна), на торжественном открытии которой 13.07.2011 г. присутствовали Президенты РФ и Швейцарии

Для получения клинкера исходные сырьевые материалы берут примерно в соотношении 3 : 1, т. е. на 1 мас. часть глины должно приходиться 3 мас. части известняка. Известна горная порода — мергель, представляет собой природную тесную смесь известняка и глины именно в таком соотношении. Там, где есть запасы мергеля, цементные заводы пользуются этим сырьем.

Первый этап самый дорогостоящий, именно на него приходится 70% себестоимости цемента. Приготовление сырьевой смеси заключается в получении однородной тонкоизмельченной смеси известняка и глины.

Обжиг сырьевой смеси — наиболее энергоемкая и ответственная операция, в результате которой образуется клинкер. Обжиг проводят во вращающихся (ротационных) печах, которые представляют собой огромные цилиндрические барабаны с углом наклона продольной оси барабана печи к горизонту 3–4°. Благодаря этому сырьевая смесь, загруженная в верхнюю часть печи, при медленном вращении барабана постепенно перемещается к нижнему, выходному концу. В печь загружают исходную сырьевую смесь, а выгружают из нее цементный клинкер. Образование клинкера сопровождается рядом сложных физических и химических процессов, в результате которых появляются новые минералы.

Вторая стадия тоже состоит из нескольких этапов. Это дробление клинкера, сушка минеральных добавок, дробление гипсового камня, помол клинкера совместно с гипсом и активными минеральными добавками. По выходу из вращающейся печи клинкер, состоящий из прочных камневидных окатанных гранул, интенсивно охлаждают воздухом с 1000 до 100–200°С в холодильниках. Помол клинкера с добавкой гипса — заключительная технологическая операция. В результате получают тонкозернистый порошок темно-серого или зеленовато-серого цвета, который и называют цементом. Полученный в результате помола цемент хранят в больших железобетонных банках — силосах, вмещающих до 10 тыс. т цемента. Здесь он постепенно охлаждается, а остатки содержащегося в нем свободного оксида кальция, взаимодействуя с влагой воздуха, гасятся. Это значительно улучшает технологические свойства цемента. Из силосов цемент отгружают потребителям в вагонах-цементовозах, автоцементовозах, крытых железнодорожных вагонах. Часть цемента упаковывают в пяти- или шестислойные бумажные мешки.

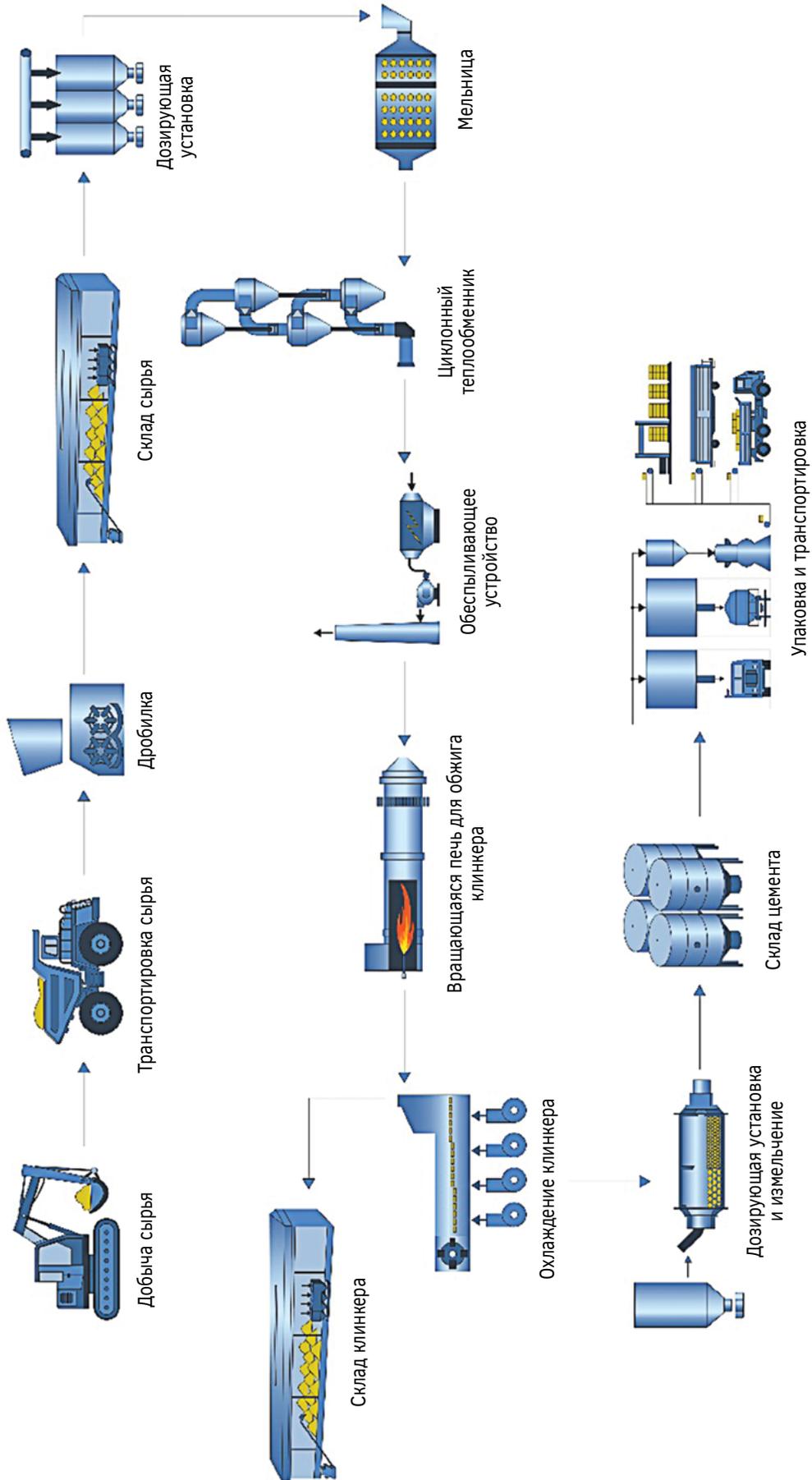


Рис. 12.22. Производство цемента

При этом некоторые технологические процессы могут совмещаться в одном агрегате или, напротив, одинаковые процессы протекать в нескольких агрегатах и осуществляться в другой последовательности. В связи с тем, что отдельные сырьевые материалы имеют различные технологические свойства (прочность, влажность, липкость, абразивность, размалываемость, спекаемость и др.), то для организации наиболее экономичного процесса их переработки и в соответствии с состоянием технологического оборудования и систем автоматизации были разработаны и получили промышленную реализацию различные способы производства цемента.

При производстве цемента используются преимущественно мокрый, сухой, полусухой и комбинированный способы (рис. 12.23–12.26). Перечисленные технологии различаются по способам приготовления сырьевой смеси и обжига клинкера. Способ выбирают в зависимости от технологических и технико-экономических факторов — свойств сырья, его однородности и влажности, и наличия достаточной топливной базы и др.

Мокрый способ производства

Технология производства цемента по мокрому способу известна с начала XX в. и ее развитие осуществлялось преимущественно путем совершенствования технических средств. В соответствии с требованиями этой технологии сырьевые компоненты подвергаются измельчению до тонкости помола шлама с содержанием до 85–90% частиц размером 80 и менее мкм. В целях минимизации расхода электроэнергии на помол, обеспечения достаточной гомогенизации компонентов и реологических свойств шлама процесс измельчения осуществляется с добавлением воды.

Мокрый способ производства используют при изготовлении цемента из мягких пород — мела (карбонатный компонент), глины (силикатный компонент). Влажность глины при этом не должна превышать 20%, а влажность мела — 29%. Мокрым этот способ назван потому, что измельчение сырьевой смеси производится в водной среде, на выходе получается шихта в виде водной суспензии — шлама влажностью 30–50%.

Измельченный материал (шлам) поступает во вращающуюся печь, где осуществляется процесс сушки шлама, декарбонизации, спекания (сопровождается химическими реакциями с получением заданных минералов, обладающих вяжущими свойствами) и охлаждения клинкера. В качестве теплоносителя используются газы с температурой факела 1800–2000°С. Продукты сгорания направлены противотоком к движению материала во вращающейся печи.

Полусухой способ производства

В середине XIX в. была разработана и нашла широкое применение технология, получившая название полусухого способа, в соответствии с которой сырьевые материалы с естественной влажностью до 15–18% высушивались в сушильных барабанах до влажности не более 5% и затем измельчались в шаровых мельницах с одновременной сушкой.

Полученная сырьевая мука направлялась на гранулятор, куда впрыскивалась вода из расчета получения гранул с влажностью \approx 8%. Гранулы (размером 10–15 мм) поступали на конвейерный кальцинатор, где осуществлялись процессы досушки, подогрева и декарбонизации гранулированной шихты, которая далее направлялась на обжиг во вращающуюся печь. Существенным недостатком полусухого способа являются высокие требования к получению достаточной прочности гранул, разрушение которых вызывает резкое увеличение пылевывосов в атмосферу и ускорение выхода из строя кальцинатора.

Сырье

- карбонатный компонент CaCO₃ (мел, известняк, мергель и др.)
- алюмосиликатный компонент (глины, золы, шлаки и др.)
- корректирующий (железосодержащий) компонент

Вода

- централизованное водоснабжение
- природные источники (артезианские скважины, водные объекты)

Энергия

- природный газ
- каменный и бурый угли
- топочный мазут
- альтернативные виды топлива

Вспомогательные материалы

- упаковочные материалы

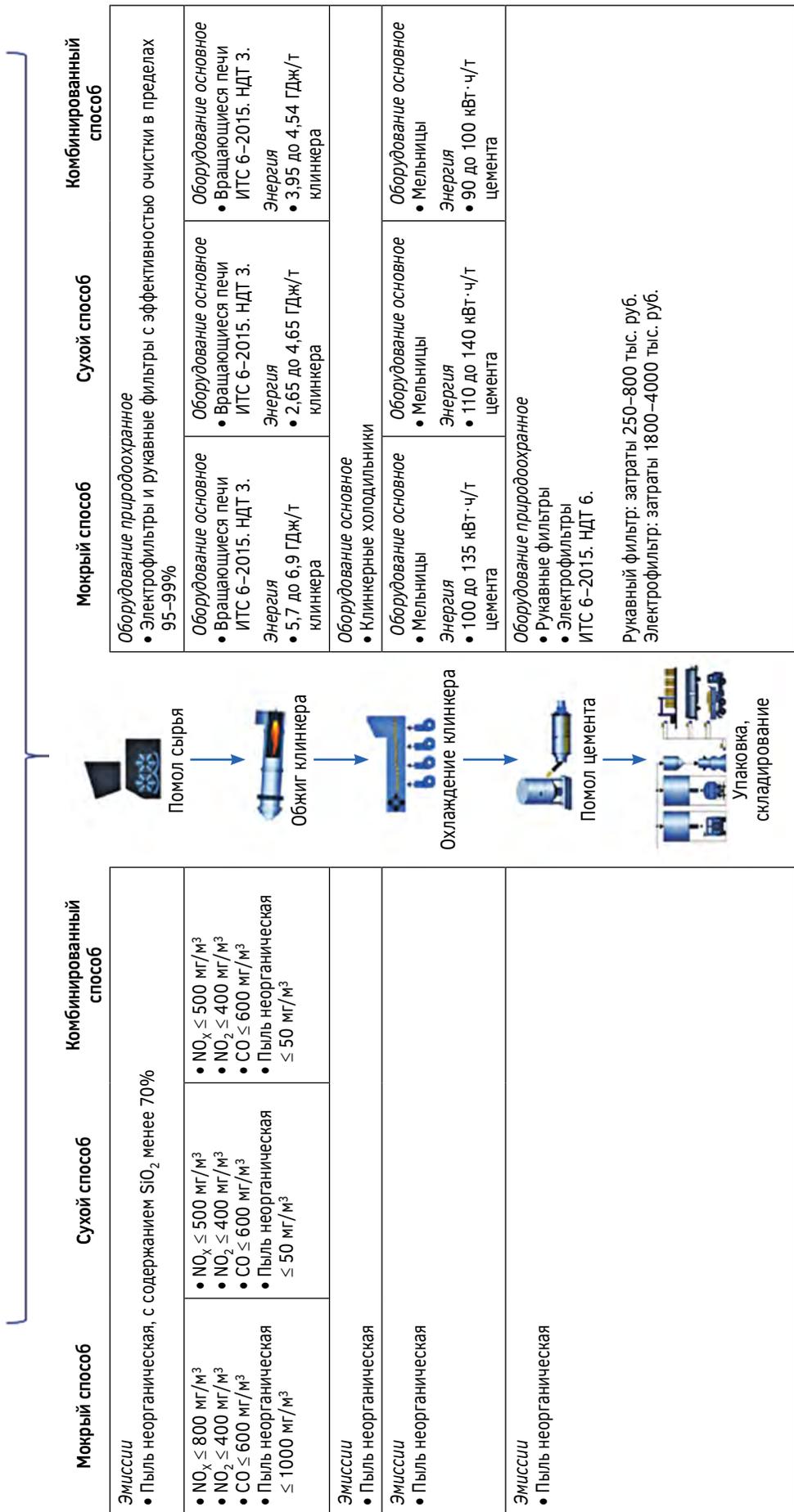
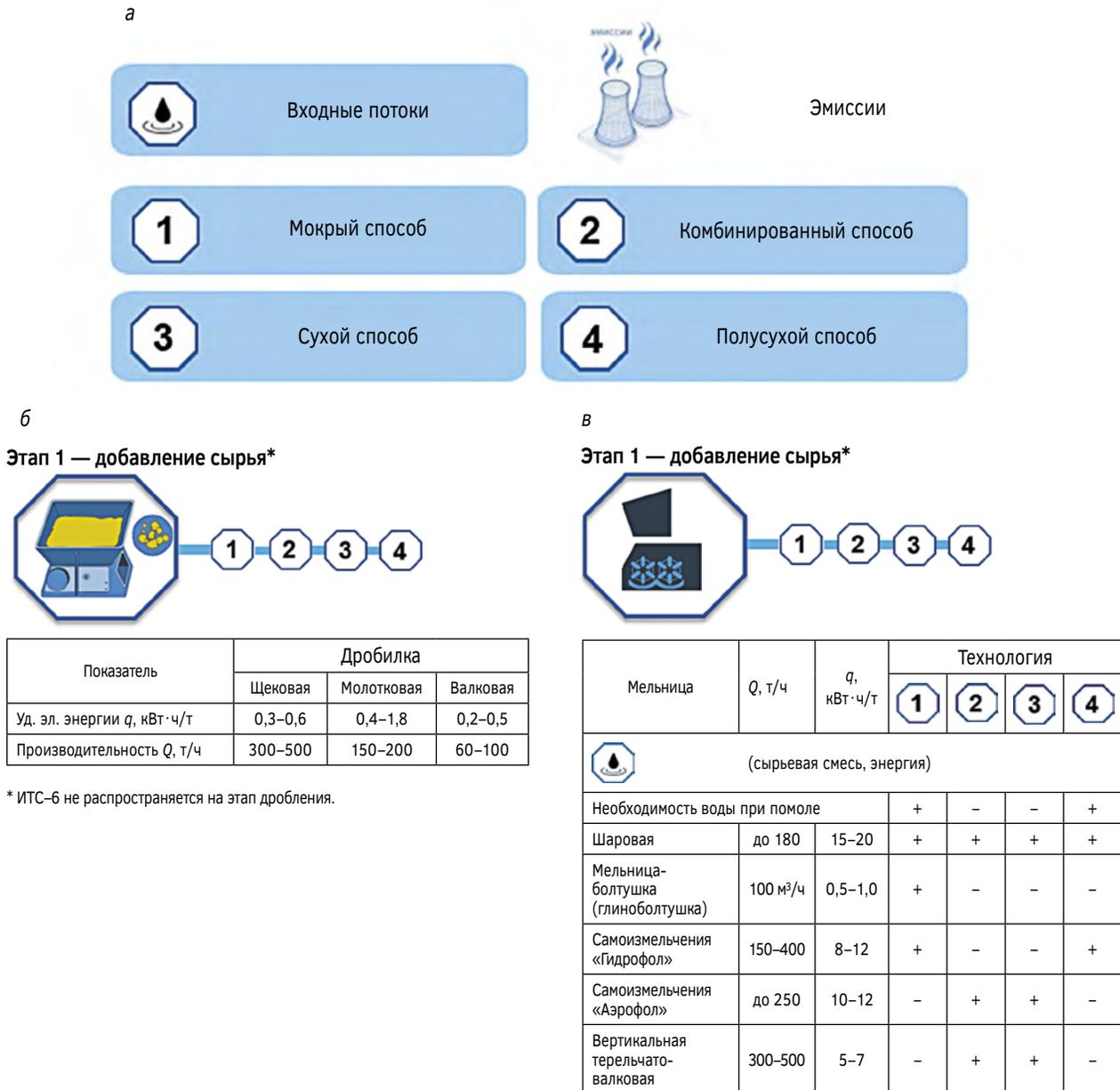


Рис. 12.23. Технологические процессы производства цемента мокрым, сухим и комбинированным способами производства

ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ — Производство цемента



* ИТС-6 не распространяется на этап дробления.

* НДТ 6.

Рис. 12.24. Этапы производства цемента:

а) способы производства; б) этап 1 «Дробление»; в) этап 2 «Измельчение сырья»

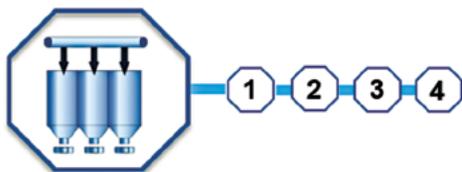
Комбинированный способ производства

Сущность технологии комбинированного способа производства заключалась в том, что процесс измельчения и гомогенизации сырья осуществляется аналогично технологии мокрого способа. Подготовленный в соответствии с требуемыми физическими и химическими показателями шлам направляется в пресс-фильтр, где происходит частичное механическое обезвоживание шлама от влажности 40–45% до 16–20%. Агломерация полученного кека осуществляется в грануляторах или сушилках-дробилках, в которых обеспечивается при

обработке кека придание ему размеров и формы для оптимизации процесса обжига. Обжиг клинкера проводят по сухому способу.

а

Этап 3 — перемешивание компонентов (корректировка и усреднение)

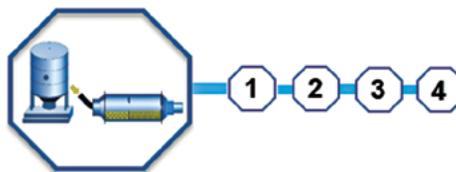


Способ корректирования	Технология			
	1	2	3	4
(сырьевая смесь, энергия)				
Порционный	+	-	-	+
Поточный	+	+*	+*	+
Усреднение сырьевой муки на всех этапах производства	-	+	+	-
Усреднение сырьевой муки в силосе	-	+	+	-

* Поточный нейтронный анализатор.

б

Этап 4 — обезвоживание / сушка / грануляция

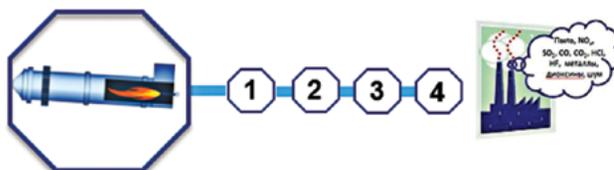


Этап	Технология			
	1	2	3	4
(сырьевая смесь, энергия)				
Обезвоживание (пресс-фильтр)	-	-	-	+
Сушка	-	+	+*	+
Грануляция	-	+	-	-

* Интегрировано в процесс измельчения.

в

Этап 5 — обжиг сырьевой смеси (шлама / муки)*



Основное оборудование	Технология			
	1	2	3	4
(сырьевая смесь, энергия)				
Вращающаяся печь	+	+	+	+
Циклонный теплообменник	-	-	+	+
Запечный декарбонизатор	-	-	+	+

* НДТ 3 технологии 2, 3, 4.

Рис. 12.25. Этапы производства цемента:

а) этап 3 «Перемешивание компонентов (корректировка и усреднение)»; б) этап 4 «Обезвоживание / сушка / грануляция»; в) этап 5 «Обжиг сырьевой смеси (шлама / муки)»

Сухой способ производства

Сухой способ заключается в том, что сырьевые материалы перед помолом или в его процессе высушиваются и сырьевая шихта выходит в виде тонкоизмельченного сухого порошка.

Промышленная технология сухого способа производства цемента разработана в 30-е гг. XIX в. Основным преимуществом в данной технологии является более низкий расход топлива на производство клинкера по сравнению с другими технологиями и особенно с технологией

мокрого способа. При сухом способе навстречу горящим газам подают не шлам, а размолотое в порошок сырье: известняк, глину, шлаки. При этом экономится топливо, которое при мокром способе расходуется на испарение воды. Так, при мокром способе затраты тепла на выпаривание влаги из шлама достигают 40–50% от общего расхода на обжиг клинкера, в то время как при сухом способе при естественной влажности сырья 6–25% эти затраты соответственно составляют 10–25%.

а

Этап 6 — охлаждение клинкера*

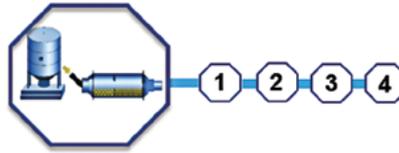


Холодильник	КПД, %	$t_{\text{клин}}$, °C	$t_{\text{втор.возд.}}$, °C
Рекуператорный	65–75	130–150	300–350
Барабанный	65–75	100–300	500–600
Колосниковый	65–90	70–200	600–700
Колосниковый с беспровальной решеткой	90	90	до 900

* ИТС-6 не распространяется на этап дробления.

б

Этап 7 — измельчение клинкера с добавками*



Мельница	Процесс			
	1	2	3	4
Шаровая	+	+	+	+
Вертикальная терельчато-валковая	+	+	+	+
Роллер-пресс (валковый измельчитель)	+	+	+	+

* НДТ 6.

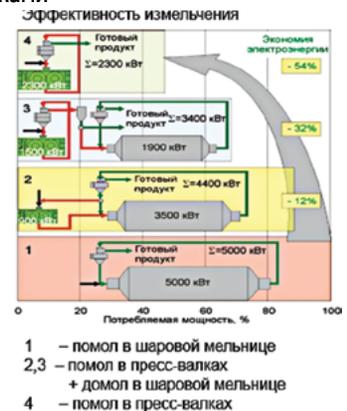


Рис. 12.26. Этапы производства цемента:

а) этап 6 «Охлаждение клинкера»; б) этап 7 «Измельчение клинкера с добавками»

До 90-х гг. XX в. широкое распространение сухого способа сдерживалось его недостатками в части повышенного пылевыведения, особенно в печах с конвейерными кальцинаторами, более сложным процессом усреднения сырьевой шихты.

В конце XX в. по мере разработки высокоэффективных агрегатов для помола сырья с одновременной сушкой, пылеулавливающих аппаратов, технологических линий мощностью до 4,0 млн т в год (для технологии мокрого способа максимальная мощность составляет 650 тыс. т в год) широкое распространение получил высокоэффективный сухой способ производства, которому, по всей вероятности, принадлежит будущее цементного производства.

Использование отходов в качестве сырьевых материалов и/или природного топлива при производстве цемента

Современное развитие материального производства сопровождается вовлечением в хозяйственный оборот огромных объемов вещества и энергии. На каждый рубль национального дохода затрачивается одна тонна природного вещества (воды, минерального сырья, топлива, биомассы, атмосферного кислорода), а готовая продукция составляет не более 1% от массы вещества, используемого для нужд народного хозяйства. В целом по промышленности затраты на материалы и энергоносители составляют почти три четверти всей суммы затрат на производство продукции.

Многие отходы (белитовый (нефелиновый), доменный шлак, зола) близки по своему химическому составу к используемым в цементной промышленности природным компонентам, поэтому одним из рациональных вариантов экономии топлива при обжиге клинкера является использование техногенных материалов в качестве сырьевых компонентов (рис. 12.27).

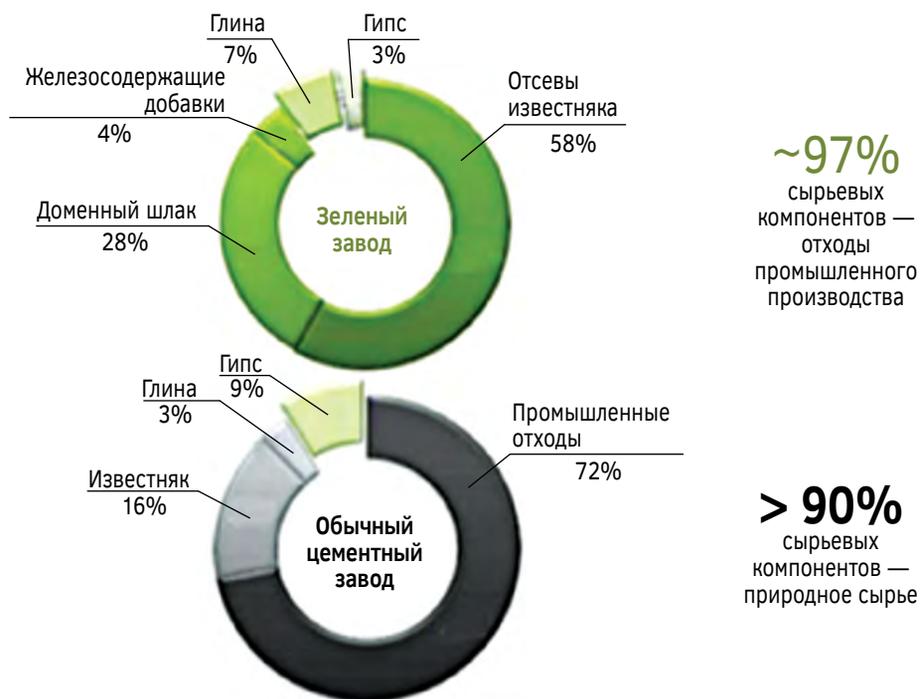


Рис. 12.27. Возможности использования отходов промышленного производства в качестве сырьевых компонентов при производстве цементного клинкера

В настоящее время в Российской Федерации образуется в год около 5 млрд т отходов, при этом 4 млрд т — при добыче полезных ископаемых и около 300 млн т на обрабатывающем производстве (в том числе в нефтяной, химической и автомобильной промышленности).

С 2014 г. Россия находится в процессе перехода на принципиально новую систему в области обращения с отходами. Основная цель нового государственного регулирования в области обращения с отходами в Российской Федерации — стимулирование экономическими способами возвращения в оборот отходов, которые можно использовать как вторичное сырье, в том числе тех, которые сегодня захораниваются на полигонах или вне их без извлечения полезных компонентов, что ведет к возрастанию нагрузки на окружающую среду, причиняет вред здоровью населения, наносит ущерб экономике в целом.

Проблема загрязнения территории страны различными отходами с каждым годом становится острее. В России ежегодно образуется 55–60 млн т только твердых коммунальных отходов (ТКО). И лишь 5–7% из них перерабатываются, в то время как в странах Европейского союза перерабатывается до 60% ТКО. По данным правительства, экологический ущерб от этого составляет более 68 млрд рублей. По статистике, на сегодняшний день 2% всей площади Российской Федерации погребены под свалками, и каждый год количество занятых ими земель увеличивается на площадь, равную Москве и Санкт-Петербургу вместе взятым.

Для России сегодня главное — найти решения, которые позволят, во-первых, снизить образование и сократить долю отходов, размещаемых на полигонах. А во-вторых, поддержать формирование «индустрии отходов», отрасли, обеспечивающей переработку накопленных и вновь образующихся отходов.

В европейских странах вопросы утилизации твердых бытовых отходов достаточно успешно решаются уже не первое десятилетие, принося участникам этого процесса многомиллионные доходы. Высокий потенциал использования бытовых отходов в промышленности и энергетике признают и в России. В рамках Ялтинского международного экономического форума, который прошел в апреле 2017 г., спецпредставитель Президента РФ по вопросам природоохранной деятельности, экологии и транспорта С. Иванов подчеркнул, что мусор

является новым возобновляемым источником энергии и перспективным видом топлива. «Мусора нам хватит и нашим потомкам на всю жизнь», — заявил Иванов.

Одним из актуальных направлений утилизации твердых бытовых отходов на сегодняшний день является переработка отходов в альтернативное топливо (АТ) с последующим его использованием на цементных предприятиях. Современные технологии позволяют с высокой эффективностью перерабатывать отходы, сортируя материалы, которые обладают достаточной теплотворной способностью и являются пригодными для производства топлива.

Цементная промышленность — это большой экологический резерв, имеющий все возможности для эффективной утилизации различного вторичного сырья: отходов переработки газа, металла, нефти, угля, биомассы, автомобильных шин, сельскохозяйственных отходов и бытового мусора (табл. 12.2).

Таблица 12.2. Производство и использование техногенных материалов

Наименование отходов	Годовой выход	Процент использования	Наличие в отвалах
Золы и шлаки ТЭС, млн т	40	7	1500
Шлаки доменные, млн т	40	20	360
Шлаки цветной металлургии, млн т	50	2	450
Шлаки ЭТФ, млн т	20	8	130
Шлаки сталеплавильные, млн т	10	0,5	70
Древесные отходы, млн м ³	до 100	до 20	н/д
Фосфогипс, млн т	25	5	280
Огарки пиритные, млн т	7	30	40
Отсевы известняка, млн т	175	7	н/д
Шины изношенные, млн т	12	4	н/д
Отходы строительства и сноса, млн м ³	13	20	н/д
ТБО, млн м ³	180	3	н/д

Имеются все предпосылки использования альтернативных видов топлива в цементных печах — высокие температуры в печи (температура материала более 1450°С, а газовой среды в зоне спекания — около 2000°С), и пребывание материала в зоне спекания более 7 секунд позволяет полностью нейтрализовать тяжелые металлы и токсичные вещества, технология безотходна.

На сегодняшний день правовые основы утилизации отходов в цементной промышленности в целях предотвращения вредного воздействия отходов производства и потребления на здоровье человека и окружающую среду, а также вовлечения отходов в хозяйственный оборот в качестве дополнительных источников сырья предусмотрены в «Стратегии развития промышленности строительных материалов на период до 2020 года и дальнейшую перспективу до 2030 года», однако реализация их затягивается.

Таким образом, замена природных сырьевых материалов и ископаемого топлива в производстве цемента различными типами отходов будут способствовать, с одной стороны, сохранению природных источников и, с другой стороны, снижению материалоемкости и энергозатрат и повышению ресурсо- и энергоэффективности производства.

СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ

У каждого из вышеперечисленных способов производства цемента (мокрого, сухого, комбинированных) есть свои достоинства и недостатки.

Так, например, в присутствии воды облегчается измельчение материалов и проще достигается однородность смеси, но расход тепла на обжиг сырьевой смеси при мокром способе

на 30–40% больше, чем при сухом (рис. 12.28). Кроме того, значительно возрастает необходимый объем печи при обжиге мокрой сырьевой смеси (рис. 12.29), так как значительная часть ее выполняет функции испарителя воды.

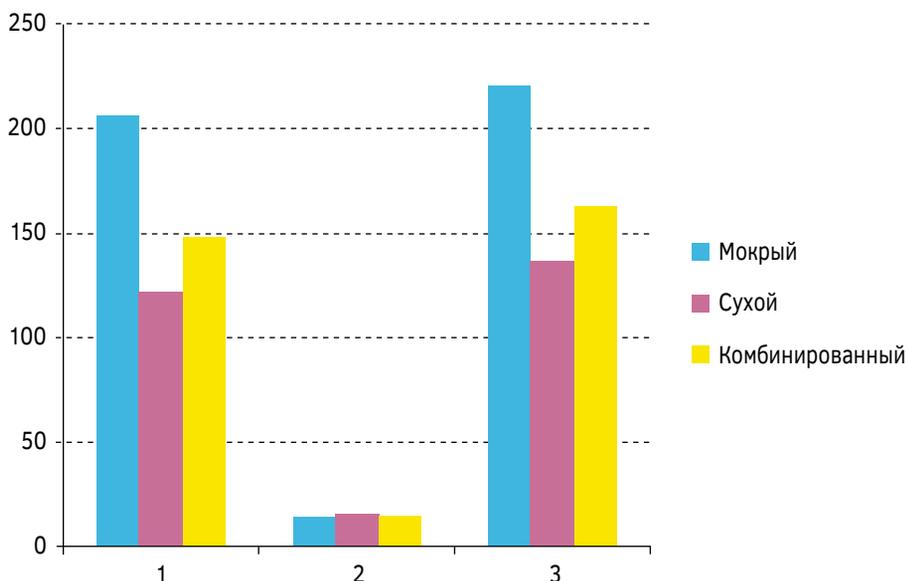


Рис. 12.28. Среднегодовые показатели энергоресурсов по способам производства, кг у. т.:
 1 — удельный расход топлива; 2 — удельный расход электроэнергии (1 кг = 8,141 кВт·ч);
 3 — приведенные энергозатраты

Выбор способов производства портландцементного клинкера определяется рядом факторов технологического и технико-экономического характера: свойствами сырья, его однородностью и влажностью, наличием достаточной топливной базы в районе строительства завода.

При природной влажности сырья более 18–20% оказывается целесообразным мокрый способ. Этот способ выгодно применять также при использовании двух мягких компонентов (глины и мела), так как измельчение их легко достигается разбалтыванием в воде. Используют мокрый способ при пестром химическом составе.



Рис. 12.29. Расчетные размеры вращающейся печи для производства 5000 т клинкера в сутки (по данным журнала ZKG 4/1999)

Сухой способ рационально применять при однородном по составу сырье, если влажность его не превышает 18–20%. На практике имеются примеры успешного функционирования

предприятий с использованием мела и мергеля с влажностью до 26% (Белорусский цементный завод, построенный до перестройки, работает на таком сырье с конца прошлого века).

Полусухой способ даст хорошие результаты при изготовлении клинкера из достаточно пластичных сырьевых материалов, когда при грануляции смеси образуются прочные и термостойкие гранулы.

При хорошей фильтруемости сырьевых шламов предпочтение следует отдавать комбинированному способу.

При сухом способе производства известняк и глину после выхода из дробилки высушивают до влажности примерно 1% и измельчают в сырьевую муку. После измельчения ее дозируют, усредняют и корректируют в специальных смесительных силосах и подают в циклонные теплообменники.

Главные преимущества сухого способа производства портландцементного клинкера:

- более высокий съем клинкера с 1 м² печного агрегата, чем в мокром способе;
- экономичность способа (снижение расхода топлива, энергетических затрат, себестоимости 1 т цемента).

При мокром способе ниже расход электроэнергии на измельчение, так как размол материалов в водной среде протекает легче, причем часть сырьевых материалов способна размучиваться (распускаться) в воде — глина, мел. Если оба сырьевых компонента мягкие (мел + глина), то экономия энергии при измельчении может достигать 10 кВт·ч на тонну сырья. Проще и надежнее осуществляется усреднение шихты по сравнению с порошкообразным состоянием в сухом способе.

При приготовлении сырьевого шлама необходимо дополнительно вводить от 30% до 50% воды, а затем ее приходится удалять испарением (в цементной печи), а это связано с излишними затратами топлива и энергии — в 1,5–2 раза больше, чем при сухом способе. В результате удельный расход тепла на обжиг при сухом способе составляет 3100–3500 кДж/кг клинкера, а при мокром расход тепла колеблется от 5800 до 6500 кДж/кг клинкера, а это ведет к снижению себестоимости продукции при сухом способе производства.

При сухом способе приготовления шихты сушка сырья производится: перед измельчением или в процессе измельчения в дробилках или мельницах с одновременной сушкой. При мокром способе производства шлам перемещается гидротранспортом — самотеком или с помощью центробежных насосов, при сухом же способе применяют пневмотранспорт, шнеки и элеваторы, что повышает загрязнение пылью воздуха в цехах и на территории завода и требует установки дополнительного оборудования для обеспыливания аспирационного воздуха.

Объем печных газов при сухом способе на 35–40% меньше, чем при мокром способе при одинаковой производительности печей. В результате при сухом способе производства снижается стоимость обеспыливания печных газов, имеются более широкие возможности использования тепла отходящих из печи газов для сушки сырья, что позволяет снизить общий расход топлива на производство клинкера, но вызывает усложнение технологии производства.

Поэтому вновь строящиеся и проектируемые цементные заводы в нашей стране рассчитаны на изготовление цемента по сухому способу как более экономичному (рис. 12.30). Такая же тенденция наблюдается и во всех промышленно развитых странах мира.

Средний расход топлива в России на обжиг тонны клинкера при мокром способе производства составляет 206,5 кг у. т. против 121,5 кг у. т./т клинкера при сухом способе производства. На выпуск такого же количества цемента расходуется примерно 115–125 кВт·ч электроэнергии. В промышленно развитых странах эти показатели в полтора раза меньше, да и съем продукции с кубометра печей в России настолько же ниже, насколько выше за ее рубежами. В себестоимости нашего цемента затраты на топливо и электроэнергию составляют в среднем 40%, а на отдельных предприятиях и 60%.

В экологическом аспекте мокрый способ оказывает наибольшее негативное воздействие на окружающую среду с учетом затрат материальных ресурсов и выбросов загрязняющих веществ (рис. 12.31).

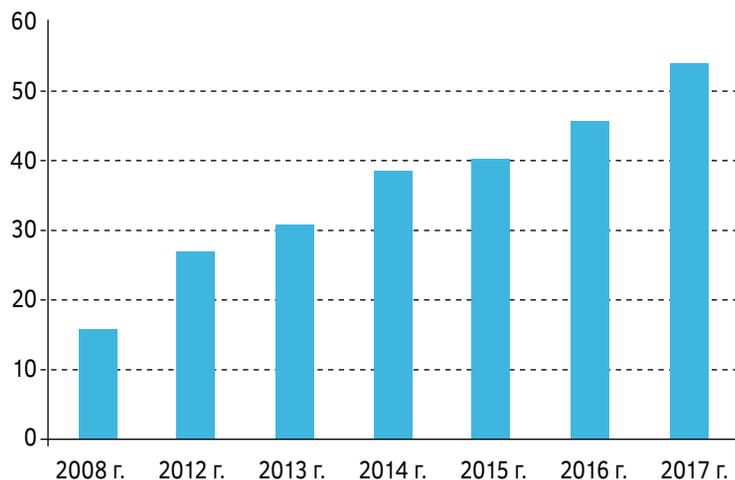


Рис. 12.30. Выпуск цемента в России энергоэффективными способами

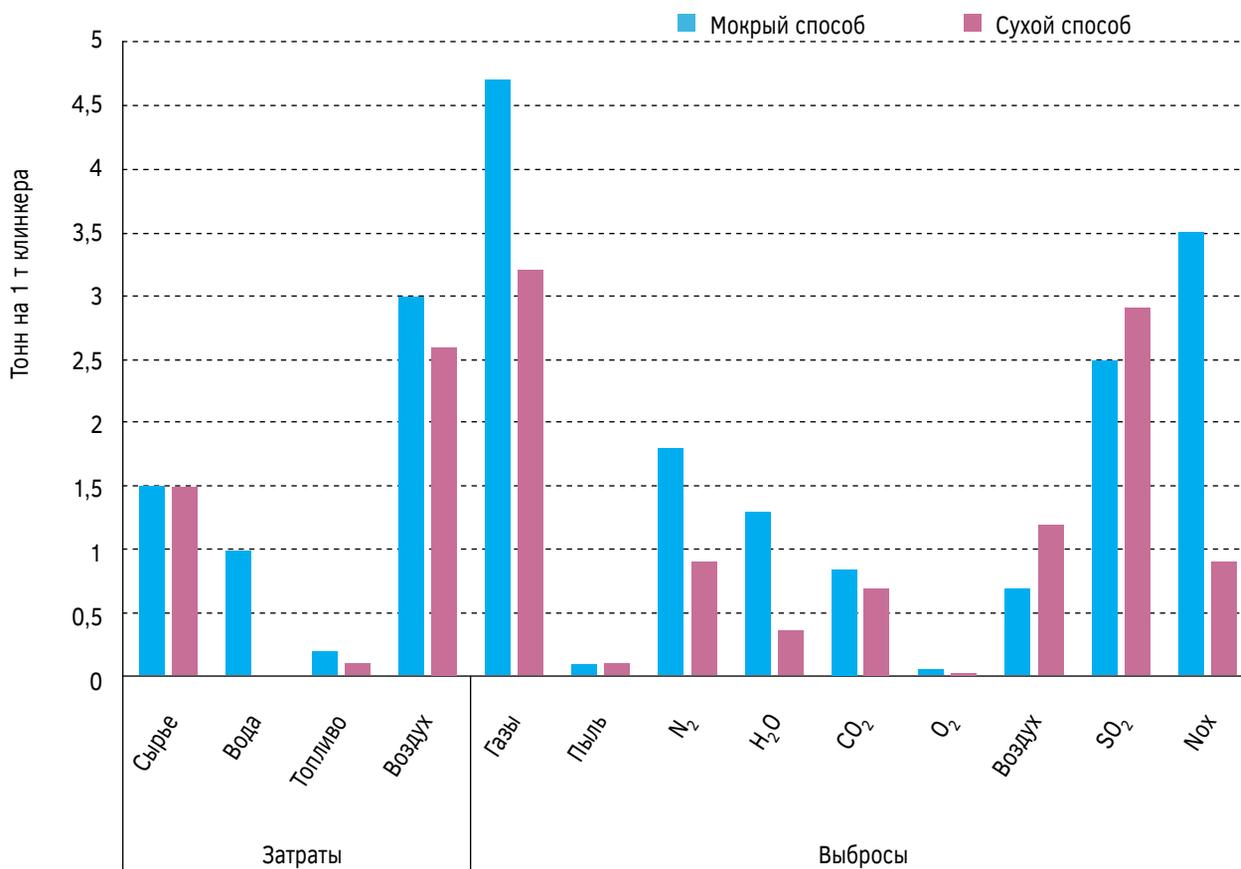


Рис. 12.31. Материальный баланс процесса производства портландцементного клинкера по мокрому и сухому способам производства

Потребление материальных ресурсов и выбросов увеличивается на 1,5 т/т клинкера. Производство портландцементного клинкера по мокрому способу требует расхода топлива примерно в два раза больше, чем по сухому. Тепло, получаемое при сжигании технологического топлива, расходуется на тепловые процессы клинкерообразования, испарение воды, а также теряется с отходящими газами, с воздухом из клинкерного холодильника, с горячим клинкером и на прямые потери в окружающую среду.

С другой стороны, при сухом способе производства несколько увеличиваются выбросы горячего третичного воздуха, что связано с использованием современных клинкерных холодильников, охлаждающих портландцементный клинкер до температур менее 80–100°С. Аэрозоли вращающихся печей сухого способа отличаются высокой дисперсностью частиц (до 75% частиц размером менее 5 мкм) и высокой температурой по сравнению с мокрым способом. Но из-за снижения расхода материалов, топлива, выбросов газов и пыли в атмосферу данная технология является более прогрессивной как в экономическом, так и в экологическом аспектах.

РОЛЬ ЦЕМЕНТНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В ГЛОБАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКЕ

Сегодня, как и раньше, цементная промышленность является наиболее многотоннажным и энергоемким производством. В мире производится более 4 млрд т цемента в год (рис. 12.32).

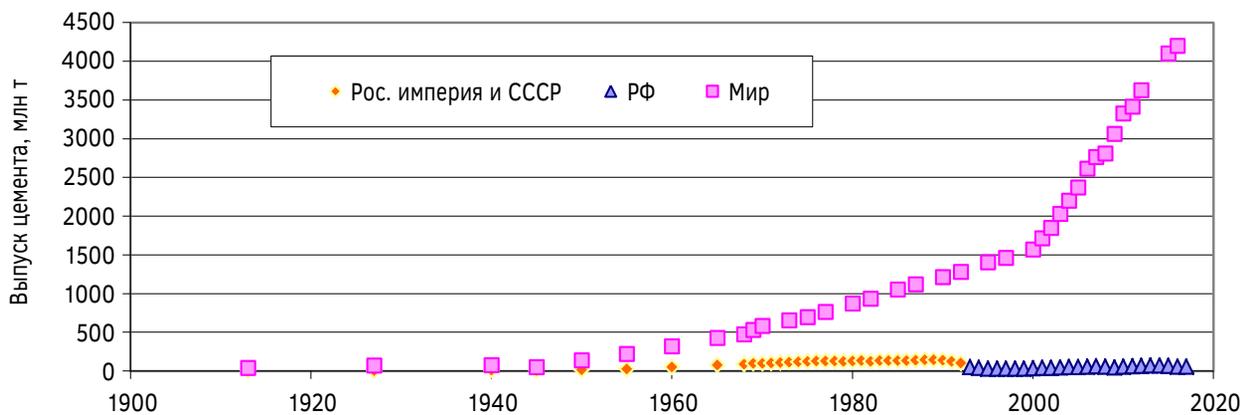


Рис. 12.32. Выпуск цемента по годам

Первое место в мировом выпуске цемента занимает Китай (более 2000 млн т) (табл. 12.3). Россия в последние два года прочно «удерживает» 10–11-е места в мировом выпуске цемента.

Производство цемента в Китайской Народной Республике неизменно росло на протяжении нескольких последних десятилетий. Год за годом фиксировались все новые и новые рекорды. В начале 80-х гг. прошлого столетия была пройдена отметка в 100 млн т в год, в конце 80-х — 200 млн т. В 90-е гг. рост продолжился, и к концу 90-х производство цемента перевалило отметку в полмиллиарда тонн в год.

С 2000 по 2010 г. цементникам Поднебесной удалось увеличить объем производства цемента еще в три раза и к концу десятилетия вплотную подойти к отметке в 2 млрд т, которая была взята уже в 2012-м. К следующей отметке в 2,5 млрд т цементники Поднебесной вплотную приблизились в 2014-м (выпущено 2466 млн т), но после этого наступил 2015-й, и цементная промышленность Китая впервые за много лет продемонстрировала откат назад. В 2016 г. удалось немного отыграть ситуацию и вернуться на уровень 2013 г. Однако в 2017 г. выпуск цемента снизился на 3,6%, составив 2316,25 млн т, и продолжает снижаться и в 2018–2019 гг. Если для цементной промышленности Российской Федерации разрыв от –5% до –8% можно назвать совсем не критичным, то для китайских производителей цемента это означает откат на уровень 2012 г. И видимо, отметка в 2,5 млрд т так и остается недостижимой для цементной промышленности Китая.

Таблица 12.3. Производство и потребление цемента по странам мира, млн т*

Страны	Производство		Потребление	
	2015 г.	2016 г.	2015 г.	2016 г.
США и Пуэрто-Рико	84,3	85,9	107	109
Бразилия	65,3	60	60	60
Китай	2350	2403	2000	2000
Египет	55	55	46	46
Индия	300	290	280	280
Индонезия	58	63	64	78
Иран	58,6	53	79	79
Япония	54,8	56	53	53
Южная Корея	51,7	55	50	50
Россия	62,1	56	80	80
Саудовская Аравия	61,9	61	65	75
Турция	71,4	77	76	77
Вьетнам	67,4	70	80	90
Остальные страны	760	810	560	620
ВСЕГО	4100,5	4194,9	3600	3697

* По данным minerals.usgs.gov.

Тем не менее за десять дней Китай производит столько же цемента, сколько цементная промышленность России за весь год. При этом количество произведенного цемента на душу населения в Китае составляет 1729 кг/чел., в то время как в России — 373 кг/чел.

Сопоставимый с Китаем рывок в мировом масштабе совершил лишь Вьетнам — рост в 31 раз в период 1990–2017 гг. в абсолютном выражении. А доля Вьетнама в общемировом выпуске цемента выросла с 0,2% в 1990 г. до 1,9% в 2017 г. Примерно в пять раз нарастили выпуск цемента Индия, Саудовская Аравия и Индонезия. Их доли в мировом производстве увеличились в полтора раза. В четыре раза увеличилось производство в Иране и Египте. При этом доля этих стран в мировом выпуске цемента выросла незначительно.

США, Турция, Южная Корея, Россия, Бразилия и Япония в 1990–2017 гг. сократили свои доли в мировом производстве. В наибольшей степени относительное сокращение коснулось США, России и Японии. В абсолютном выражении сократили выпуск цемента только Россия и Япония — примерно в одинаковой степени — 66 и 67% в 2017 г. к уровню 1990 г. соответственно.

Таким образом, 75% роста мирового производства цемента за период 1990–2017 гг. пришлось на рост отрасли в Китае. Индия обеспечила 7,5%. Вклад остальных стран незначителен.

1 января 2015 г. был подписан договор о формировании Евразийского экономического союза (ЕАЭС), который сегодня включает пять государств-членов — это Республика Армения, Республика Беларусь, Республика Казахстан, Кыргызская Республика и Российская Федерация. Рынок цемента ЕАЭС имеет потенциал к дальнейшей консолидации. Объем основного производства и потребления цемента приходится на Россию: 81% — в мощностях, 80% — в производстве и 80% — в потреблении. На долю иностранных международных цементных холдингов приходится около 20% мощностей ЕАЭС.

Если посмотреть структуру мощностей на мировом цементном рынке в 2016 г., то мощности ЕАЭС составляют около 10% (рис. 12.33).

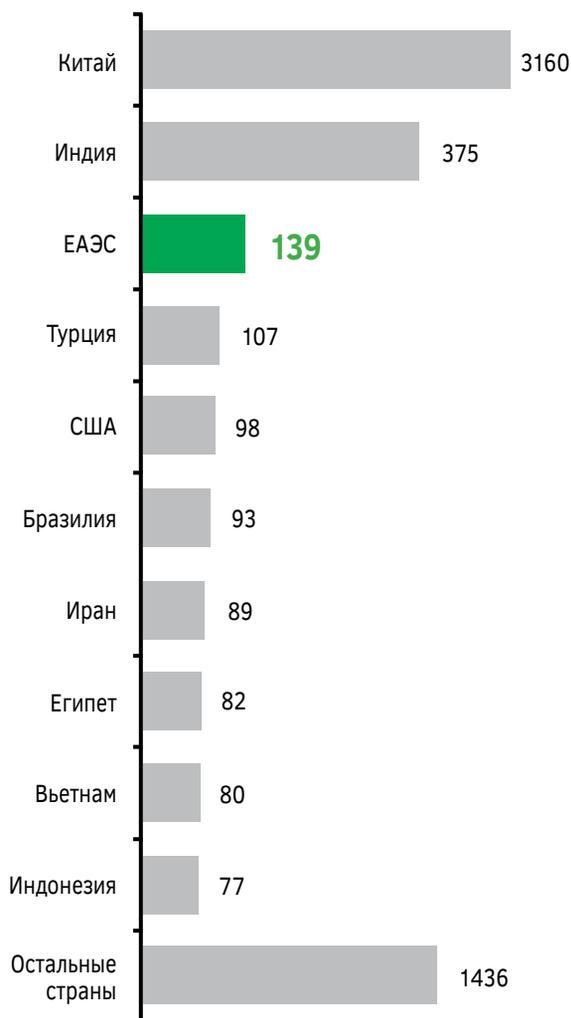


Рис. 12.33. Структура мощностей на мировом цементном рынке в 2016 г., млн т, по данным аналитиков Ernst&Young

В России максимальный объем производства цемента 84,7 млн т был достигнут в 1989 г. Анализ производства и потребления цемента за последние 30 лет, по данным компании СМ ПРО и аналитического агентства «Амикрон-консалтинг», свидетельствует о цикличном развитии российского рынка, который подвержен внешним факторам и макроэкономическим тенденциям (рис. 12.34–12.35).

Ввод новых 26 технологических линий в России общей мощностью ~ 36 млн т цемента в год и наличие еще потенциальных семи современных технологических линий мощностью 15 млн т наряду с падением рынка сформировало существенный профицит мощностей на российском рынке. При этом валовый объем потребления увеличивается с каждым следующим периодом роста. С 2014 г. рынок упал более, чем на 20%. По окончании текущего периода стагнации ожидается период роста.

По данным СМ ПРО, общий профицит мощностей на рынке стран России, Беларуси и Казахстана составляет более 63 млн т. Цементная промышленность стран находится в жесточайшей конкуренции, результатом которой является остановка действующих предприятий и отдельных технологических линий, а в некоторых случаях — банкротство предприятий.

В 2018 г. ситуация с данными о производстве цемента в целом по России и по отдельным заводам была очень неровной, российскими заводами суммарно было произведено 53,6 млн т цемента.

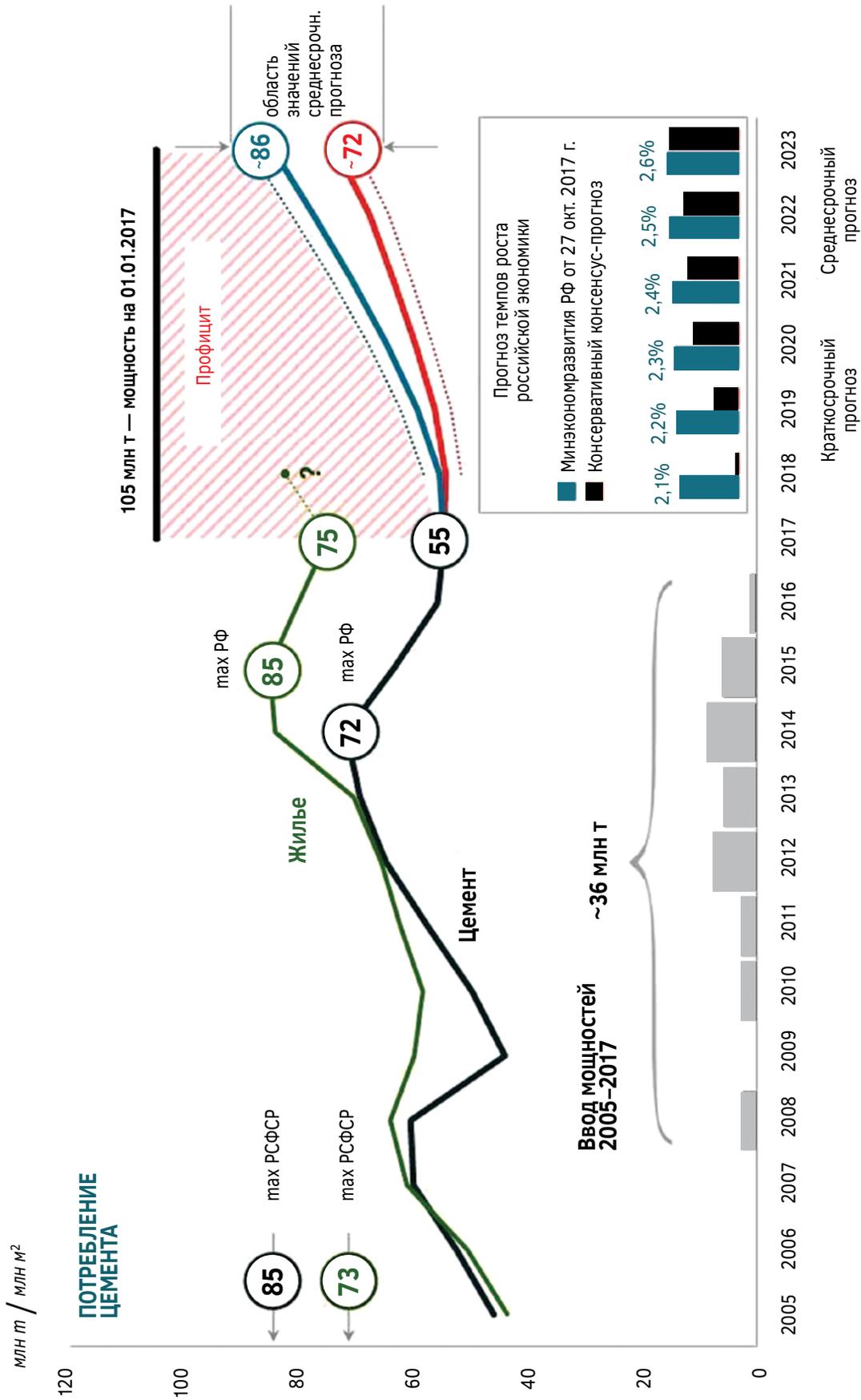


Рис. 12.34. Прогноз баланса производства и потребления цемента на федеральном уровне, по данным НИИ ПСМ и СМПРО

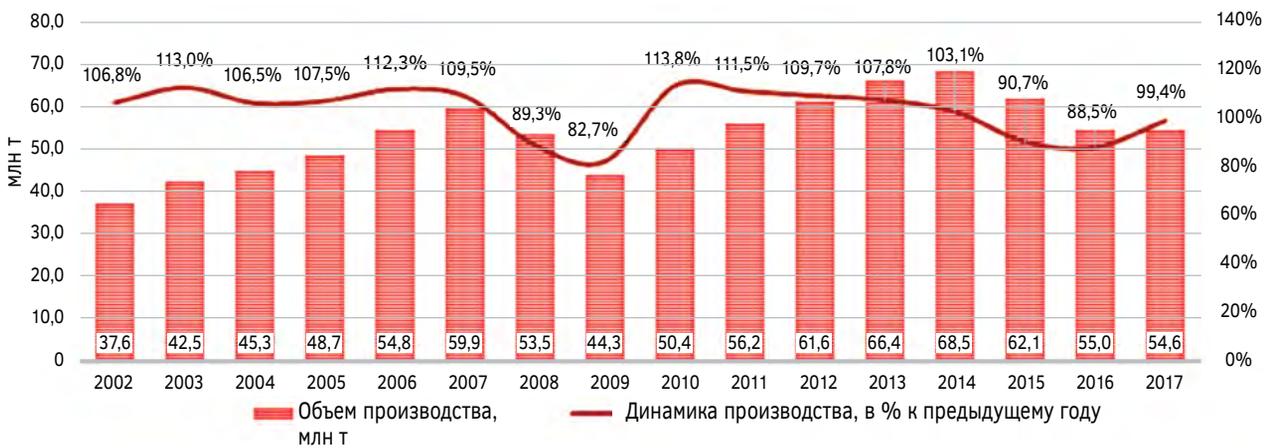


Рис. 12.35. Выпуск цемента в Российской Федерации по годам, по данным «Амикрон-консалтинг»

Есть вероятность, что статистика производства может завышаться по ряду предприятий, в особенности по заводам, входящим в крупные холдинговые структуры. Так, по оценке «Амикрон-консалтинг», объемы выпуска снизились по сравнению с 2016 г. на 0,6%, в то время как по данным Росстата — на 0,3%. Тем не менее ситуация на рынке цемента все еще остается более прозрачной, чем в других секторах экономики. Не в последнюю очередь это связано с наличием доступной информации о железнодорожных поставках, которые позволяют отслеживать реальную динамику отгрузки цемента с заводов и сопоставлять ее с данными о производственных показателях.

В 2018 г. аналитики ожидали рост производства цемента на 3%. При этом основными драйверами должны были стать реализация «Стратегии развития жилищной сферы Российской Федерации на период до 2025 года», при которой ежегодный ввод жилья должен был быть 120 млн м², рост выдачи ипотечных кредитов, вызванный дальнейшей либерализацией кредитных ставок и реализацией указа Президента России Владимира Путина о компенсации части ипотечных кредитов при рождении второго ребенка. Однако по итогам 2018 г. объем производства цемента в Российской Федерации сократился на –1,8% до 53,6 млн т. Потребление за тот же период составило 54,0 млн т, снизившись в сравнении с 2017 г. на 1,5 млн т (2,7%).

ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ

Российская цементная промышленность находится в числе самых быстрорастущих мировых индустрий и характеризуется достаточной конкурентоспособностью на внутреннем рынке и низкой конкурентоспособностью на мировом рынке. Основным показателем неконкурентоспособности цементной отрасли России является все еще высокая доля производства цемента по «мокрому» способу, составляющая на сегодняшний день 46%.

Основным недостатком российских цементных заводов является то, что они все еще используют мокрый способ производства цемента, который гораздо более энергоемкий, чем используемый в развитых странах мира сухой способ. Поэтому для компаний важно постепенно переходить на более прогрессивные энергосберегающие технологии.

Однако переход на сухой способ производства влечет за собой проблемы. Если цена тонны условного топлива у нас в стране повысится до уровня западной, то не менее 80% цемента Россия вынуждена будет производить по сухому способу или же вообще прекратить его производство. Ведь дешевле станет покупать его в Турции, Польше, Китае. Энергоемкий мокрый способ производства цемента неконкурентоспособен по сравнению с сухим, более

дешевым. На коренную же реконструкцию и модернизацию производства требуются очень большие средства.

Предприятия отрасли не в состоянии самостоятельно осуществить серьезные мероприятия по техническому перевооружению, тем более переход на более экономичный и производительный сухой способ. На реконструкцию одного предприятия годовой мощностью в 1 млн т цемента требуется 60–70 млн долларов. Для того чтобы построить более или менее крупный завод, который должен производить не менее 0,25–0,3 млн т продукции в год, необходимо вложить от 45 до 60 млн долларов. А чтобы построить крупный завод мощностью например 4,0–4,5 млн т, то нужно вложить уже от 270 млн до 360 млн долларов. Поэтому сейчас не стоит «зацикливаться» только на сухом способе производства — необходимо планомерно, настойчиво и продуманно готовить финансовую и техническую почву для его внедрения, когда появятся инвестиции.

А пока необходимо использовать менее капиталоемкие и эффективные технологии, существующие давно, например помол сырья и цемента в замкнутом цикле. При этом намного повышается качество цемента и на 15–30% сокращаются расходы электроэнергии на его помол.

Есть еще целый ряд апробированных технических решений, обеспечивающих существенное уменьшение расхода топлива на обжиг клинкера при мокром способе его производства. Одно из них — снижение влажности шлама за счет применения новых, более эффективных его разжижителей, позволяющих сократить до 15–20 кг удельный расход топлива. Экономии ресурсов способствует и применение новых высокоэффективных материалов для футеровки подготовительных зон вращающихся печей, а дополнительное питание печей техногенными продуктами повышает их производительность и снижает расход топлива не менее чем на 10%. Все вышеперечисленное позволяет приблизить мокрый способ производства по удельным расходным показателям к сухому, обеспечить ему конкурентоспособность.

Внедрение современного оборудования с циклонными теплообменниками и декарбонизаторами, с холодильниками пятого поколения на самых современных помольных установках с предизмельчителями и сепараторами последних моделей позволит расходовать на тонну клинкера не более 100–110 кг топлива.

Реконструкция ряда предприятий цементной промышленности включена в перечень важнейших строек, финансируемых за счет средств федерального бюджета. Из-за отсутствия этих средств основным источником финансирования становятся собственные средства предприятий, заемные и привлеченные средства.

По данным НИИ ПСМ и СМПРО, цементная промышленность имеет огромную закредитованность — объем задолженности отрасли перед банками составляет ≈ 250 млрд рублей. Стоимость заемного финансирования для крупных предприятий в 2015–2017 гг. составляла 12–18%, для мелких и средних — более 15%.

Загрузка мощности предприятий последние 2–3 года в среднем по отрасли ≈ 50 –60%, мощности превосходят объем потребления цемента почти в два раза. Даже при самом лучшем сценарии развития экономики в отрасли мощностей достаточно для удовлетворения спроса на горизонте до 2025–2030 гг., при этом еще лет десять строить новые заводы не надо.

В числе самых острых технологических проблем многих цементных предприятий в ЕАЭС в настоящее время — низкая энергоэффективность и, как следствие, высокая себестоимость выпускаемой продукции. Причины низкой производительности на уровне процесса производства — крайне низкая загрузка мощностей, использование мокрой технологии, приводящей к чрезмерному потреблению энергии. В то же время структура производства цемента в странах ЕАЭС кардинально отличается от мировой: так, в 2015 г. доля производства мокрым способом в России, Казахстане и Армении составляла 48,0, 30,8 и 31,0% соответственно. Однако в странах ЕАЭС наблюдается тенденция к модернизации производства. Так, в России происходит увеличение загрузки мощностей по производству цемента сухим способом (рис. 12.36).

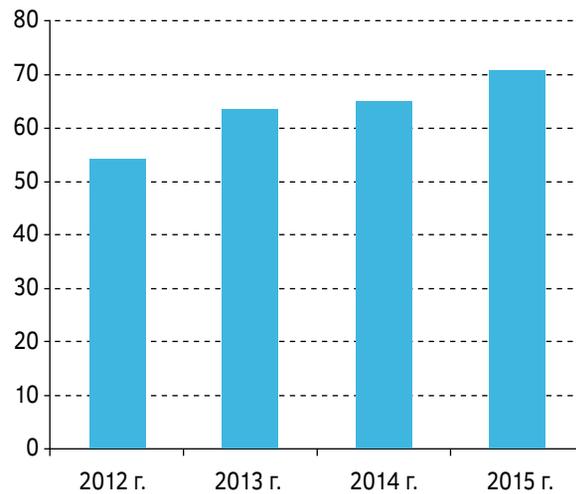


Рис. 12.36. Доля загрузки мощностей по производству цемента сухим способом в России в 2012–2015 гг., по данным ежегодного опроса Ernst&Young

К числу актуальных проблем цементной отрасли стран ЕАЭС следует отнести недостаточно высокое качество производимой продукции и наличие контрафакта. Перспективы предприятий цементной промышленности как России, так и стран ЕАЭС заключаются в формировании цивилизованного рынка цемента, где основными игроками являются стратегические участники-цементники, заинтересованные в долгосрочном развитии рынка.

Содержание клинкера в цементе, называемое клинкер-фактором или соотношением клинкер / цемент, свидетельствует об «экологичности» производства цемента. Чем ниже это соотношение, тем меньше парникового газа CO_2 выделяется при получении 1 кг цемента (рис. 12.37).

Выброс парниковых газов, особенно диоксида углерода (CO_2), связан главным образом со сжиганием топлива и с декарбонизацией известняка, который в чистом виде содержит 44 (масс.) % CO_2 . Производство цемента отнесено к приоритетным источникам выбросов парниковых газов в промышленности не только в Европейском союзе, но и в других странах мира.

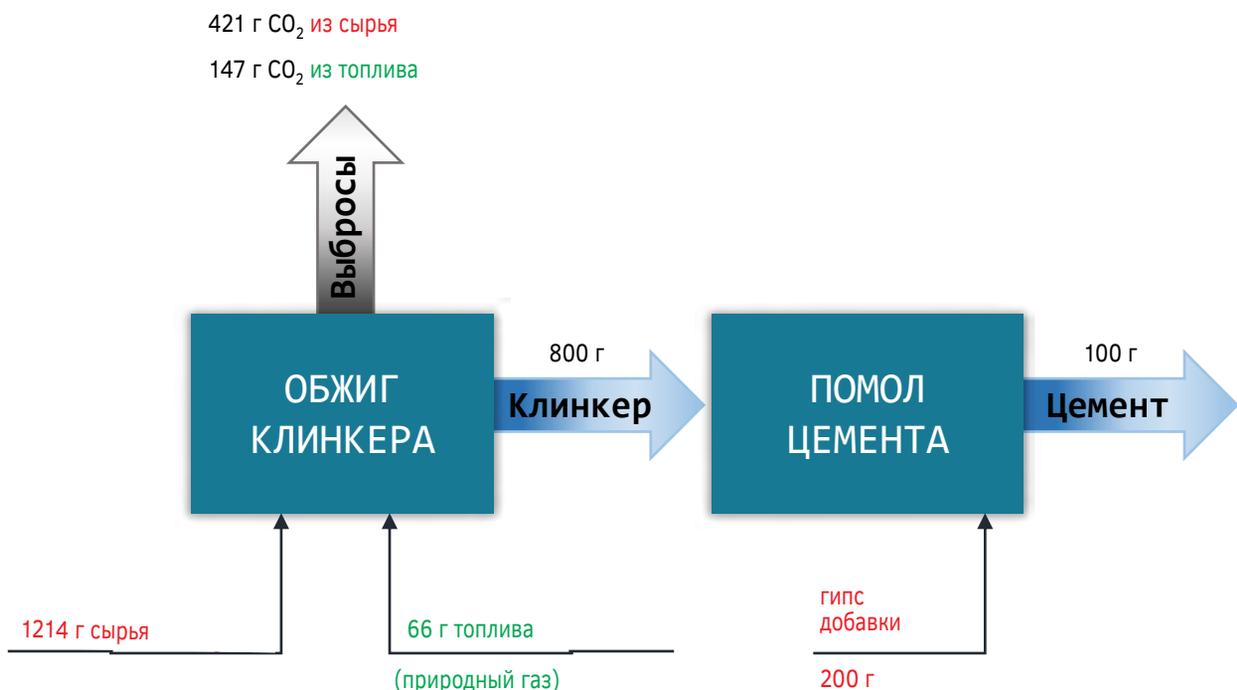


Рис. 12.37. Выбросы CO_2 при производстве 1 кг цемента

Однако диоксид углерода не включен в перечень нормируемых параметров производства. Напротив, в Европейском союзе выбросы CO₂ от производства цемента включены в Систему торговли выбросами парниковых газов.

Во многих странах мира разрабатываются и действуют отраслевые руководства по повышению энергоэффективности и в ряде случаев по сокращению выбросов парниковых газов. Отраслевыми руководствами по повышению энергоэффективности являются Energy Star (США), Руководство по энергоменеджменту (Великобритания), Директива о промышленных выбросах (ЕС).

Организация «Инициатива по устойчивому развитию цементной промышленности»²⁸ (Cement Sustainability Initiative, CSI) совместно с Международным энергетическим агентством (International Energy Agency, IEA) установила в качестве приемлемого целевого показателя на 2050 г. выбросы в размере 370 кг CO₂ на 1 кг портландцемента. Эта цель соответствует сценарию повышения температуры окружающей среды во всемирном масштабе к 2100 г. на 2°С.

Помимо надлежащего проведения операций обжига цементного клинкера рекомендуется использовать следующие методы предотвращения и контроля выбросов CO₂:

- Выбор технологического процесса и режима работы, способствующих повышению эффективности энергопотребления (сушка / предварительный нагрев / предварительный обжиг).
- Выбор топлива с низким отношением содержания углерода к калорийности (например, природный газ, дизельное топливо или некоторые отходы, используемые в качестве топлива).
- Увеличение использования биогенного (нейтрального в отношении выбросов CO₂) топлива.
- Выбор сырья с низким содержанием органических веществ.
- Производство многокомпонентных цементов, которые потенциально позволяют существенно снижать потребление топлива и, соответственно, выбросы CO₂ в расчете на тонну конечного продукта.

В общемировой практике наблюдается снижение клинкер-фактора начиная с 1990 г. (рис. 12.38). Анализ данных, представленных на рис. 12.38, показывает, что наименьшее соотношение клинкер / цемент характерно для Индии и Бразилии, являющихся лидерами по производству цемента.

Поэтому производство многокомпонентных цементов (где клинкер-фактор составляет 0,70–0,75) позволяет существенно снизить потребление и сырьевых материалов, и топлива, что соответственно ведет к снижению выбросов CO₂. Именно поэтому видовой структуре производства цемента уделяется большое внимание.

В видовой структуре производства цемента обращает на себя внимание продолжающаяся длительное время тенденция снижения доли выпуска шлакопортландцемента. Если в 1990 г. его доля в общем выпуске составляла около 28%, то в настоящее время — около 3%. Это ведет к повышению себестоимости цемента и, соответственно, к росту цены. Если в 2010 г. промышленность выпускала 48% бездобавочных цементов и 52% цементов с добавками, то в 2017 г. выпуск цементов с добавками снизился до 43%. Происходит неуклонное снижение цементов с добавками.

²⁸ Глобальная ассоциация производителей цемента и бетона (Global Cement and Concrete Association (GCCA)), одним из учредителей которой является холдинг «ЕВРОЦЕМЕНТ груп», объявила о создании стратегического партнерства с Всемирным советом предпринимателей по устойчивому развитию (World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)). Стороны намерены сотрудничать и создавать синергию программ двух организаций и их участников. С 1 января 2019 г. WBCSD передала под эгиду GCCA деятельность CSI. В настоящее время членами GCCA являются десять компаний — лидеров отрасли из разных стран: «LafargeHolcim», «CEMEX», «CNBM», «CRH», «Dangote», «Евроцемент», «HeidelbergCement», «Taiheiyо», «Ultratech» и «Votorantim».

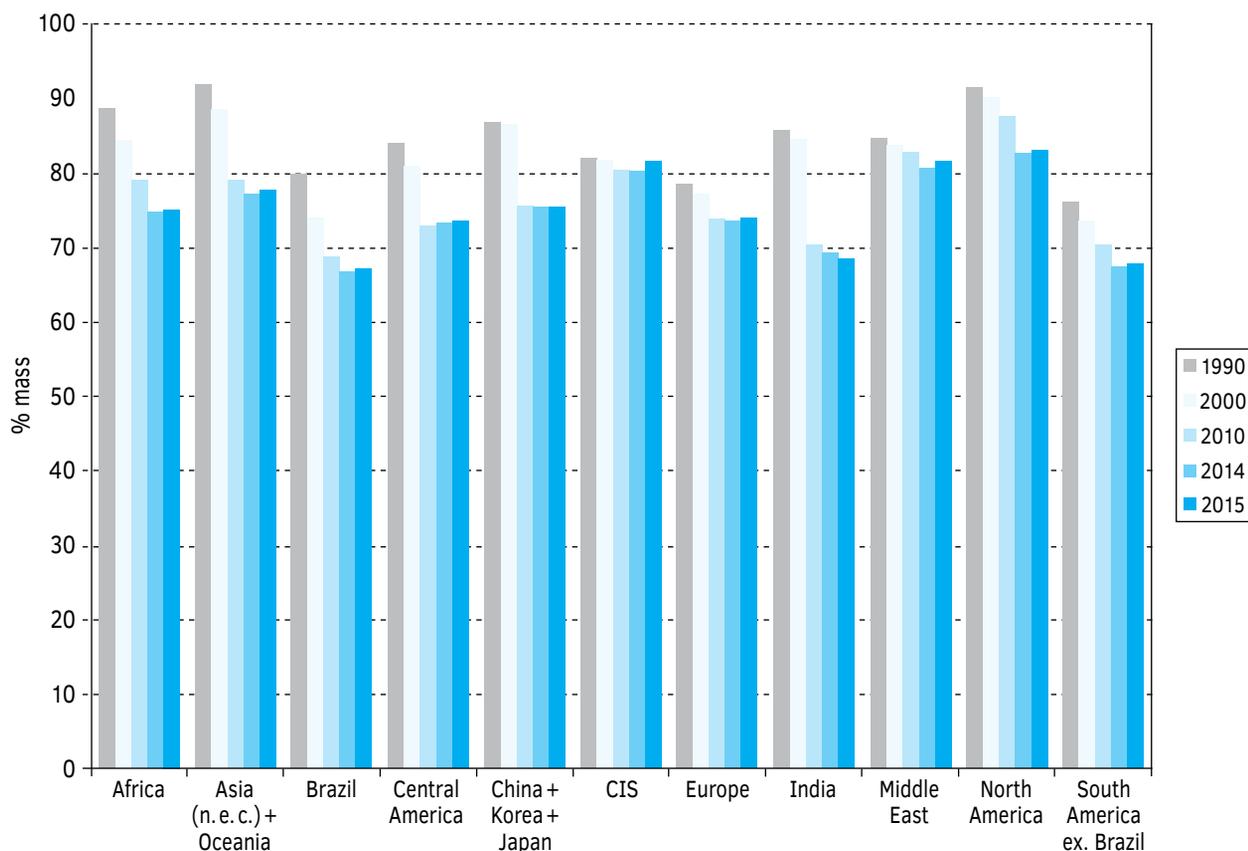


Рис. 12.38. Динамика изменения соотношения клинкер / цемент (средневзвешенное значение) в 1990–2015 гг., по данным VDZ

Заменителем клинкера в цементе, помимо шлака, могут быть золы-унос, пуццоланы, известняк и др.

Изменение видовой структуры потребления цемента в основном проходило в период экономических реформ 1990-х гг. За последние годы структура потребления по видам практически не изменилась, поскольку цементные заводы России приспособились к потребностям рынка.

Особо стоит отметить, что текущие потребности рынка представляются малообоснованными и вызваны общим снижением культуры использования цементов по их назначению. Нередко вместо малоклинкерных цементов используются бездобавочные цементы. Так, например, цемент ЦЕМ I используется для производства кладочных и штукатурных растворов и в выпуске многих изделий, где экономически, а иногда и технически целесообразно применять низкомарочные и добавочные цементы.

В условиях снижения темпов строительства на протяжении последних нескольких лет наблюдается рост потребления высокомарочного цемента для производства более качественной и конкурентоспособной продукции. В 2018 г. доля высокомарочного цемента выросла на 4 п. п. и достигла 78%. В случае возобновления темпов роста строительства в 2019 г. доля высокой марки в потреблении цемента также продолжит расти. А по дорожной карте к 2050 г. клинкер-фактор в России должен снизиться с 0,89 (как в настоящее время) до 0,67.

В цементной отрасли назрело множество проблем. Ряд из них носят общий характер для всех игроков рынка: падение спроса со стороны строителей гражданско-жилых объектов (70–80% потребления цемента в стране формируется застройщиками жилья), ежегодный рост тарифов естественных монополий, за которыми не поспевает цементный рынок, недоступность банковского кредитования, проблемы с контрафактной продукцией, недостаточно

тщательная защита прав производителей цементной продукции, а также отсутствие драйверов отрасли в виде реализации крупных инфраструктурных проектов с применением цемента.

Огромной проблемой для отрасли по-прежнему остается наличие старых заводов, требующих модернизации в соответствии с экологическими стандартами, а также требованиями к качеству продукции. По мнению большинства участников рынка, драйвером отрасли может стать инфраструктурное строительство с применением продукции цементных предприятий, внедрение инновационных технологий, дешевые кредиты, а также государственные программы по сносу аварийного жилья в регионах (для стимулирования жилищного строительства). Назрела необходимость изменений в части нормативной базы и внедрения новых технологий.

Сохранение текущего состояния производственных фондов предприятий отрасли приведет к усилению негативного воздействия на экологию и повышению финансовой нагрузки, связанной с ужесточением законодательства в области охраны окружающей среды. Таким образом, модернизация производственных мощностей и решение вопроса экологической безопасности являются приоритетами промышленной политики как России, так и стран ЕАЭС.

Одна из главных задач экологической политики на среднесрочный период — применение принципа нормирования допустимого воздействия на окружающую среду на основе показателей наилучших доступных технологий.

Целью внедрения механизма НДТ, помимо снижения уровня промышленного загрязнения, будет являться ускоренное технологическое развитие цементной отрасли. Заводы, обязанные принимать меры, направленные на снижение отрицательного воздействия на окружающую среду в целях сохранения себестоимости на конкурентном уровне, будут вынуждены сконцентрировать усилия на модернизации и повышении эффективности технологий, а также на оптимизации производственных издержек. Внедрение механизма НДТ также избавит от необходимости установления единых для всех предприятий регламентов, которые могут не учитывать особенности процессов производства, применяемого сырья и т. п.

Проблем в цементной отрасли назрело немало. Так, рост цен на цементную продукцию не поспевает за тарифами естественных монополий — разница может достигать до 1200 рублей за 1 т цемента.

В среднесрочной и долгосрочной перспективах положительными факторами для отрасли станут реновация жилого фонда, реализация проектов комплексного освоения территорий, увеличение доли строительства цементобетонных дорог, использование минеральных вяжущих для укрепления грунтов и 3D-печать.

Важнейшими проблемами цементной промышленности является снижение конкурентоспособности цементных предприятий России. В целях повышения эффективности работы цементных предприятий необходимо решить следующие проблемы.

На макроуровне:

- увеличение вклада предприятий в ВВП;
- модернизация предприятий по производству цемента с целью выпуска конкурентоспособной продукции;
- ослабление до минимума зависимости страны от импорта цемента и расширение экспорта продукции;
- увеличение налоговых поступлений в консолидированный бюджет Российской Федерации;
- снижение до минимума потребления природных ресурсов: сырья, топлива, минеральных добавок;
- улучшения экологии за счет вовлечения в оборот вторичных сырьевых ресурсов (что должно стать общегосударственной задачей), использование экологически чистого оборудования и технологий;

- восстановление отраслевой науки;
- восстановление машиностроительной базы цементной промышленности;
- снижение доли энергозатратных производств;
- повышение низкого уровня автоматизации технологических процессов предприятий, введение в эксплуатацию в 1990 г.

На микроуровне:

- обеспечение потребности региональных рынков в строительных материалах по объемам, ассортименту и качеству;
- формирование эффективных рыночно-ориентированных бизнес-структур нового поколения;
- повышение производительности труда;
- повышение спроса на квалифицированные научно-технические кадры.

Необходимость рационального использования и экономии топливно-энергетических ресурсов указывает на то, что назрела объективная необходимость коренной реконструкции отечественной цементной промышленности на основе ввода производственных фондов с использованием энергосберегающих технологий и вывода из эксплуатации морально и физически изношенного оборудования.

10 мая 2016 г. Правительством РФ утверждена «Стратегия развития промышленности строительных материалов на период до 2020 года и дальнейшую перспективу до 2030 года».

Целями Стратегии являются:

- формирование высокотехнологичной, конкурентоспособной, устойчивой и сбалансированной (в части спроса и предложения) промышленности строительных материалов инновационного типа, обеспечивающей внутренний и внешний рынки качественной, доступной и энергоэффективной продукцией;
- снижение зависимости отрасли от зарубежных технологий, оборудования и сырьевых компонентов;
- обеспечение занятости населения и повышение уровня жизни граждан.

Реализация таких перечисленных в Стратегии мер, как повышение финансовой доступности ресурсов для инновационных проектов, восстановление отраслевой науки и обеспечение ее устойчивой связи с производством путем организации деятельности отраслевых НИИ, а также применение инструментов налогового стимулирования инвестиционной деятельности предприятий, позволит провести реконструкцию и создать материалоемкую и энергоэффективную отечественную цементную промышленность.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Артоболевский, И. И.* Очерки истории техники в России (1861–1917) / И. И. Артоболевский, А. А. Благодравов. — М. : Наука, 1975. — 397 с.
2. *Вайс, В. М.* Чудо-порошок / В. М. Вайс. — Л. : Стройиздат, 1966. — 140 с.
3. *Василик, Г. Ю.* Цементная промышленность России в 2018 году / Г. Ю. Василик, Е. М. Еремина // Цемент и его применение. — 2019. — № 1. — С. 22–33.
4. *Высоцкий, Е. В.* Итоги отрасли в 2017 году. Прогноз балансов спроса и предложения в промышленности строительных материалов. [Выступление на конференции «Dry Mix Open 2018», Москва, 28 февраля — 1 марта 2018 г.] / Е. В. Высоцкий. — М., 2018. — 15 с. — URL: <https://docplayer.ru/73787168-Itogi-otrasli-v-2017-godu-prognoz-balansov-sprosa-i-predlozheniya-v-promyshlennosti-stroitelnyh-materialov-sm-pro.html> (дата обращения: 23.10.2019).
5. *Гузь, В. А.* Российская цементная промышленность в 2018 году / В. А. Гузь, В. И. Жарко, Е. В. Высоцкий // Цемент и его применение. — 2019. — № 1. — С. 18–27.
6. *Запорожец, И. Д.* Основные даты истории развития способов получения и применения гидравлических вяжущих (цементов) / И. Д. Запорожец, В. В. Кинд // Тр. Лен. индустр. инст. (раздел строительного дела и гидротехники). — 1937. — № 9, вып. 2. — С. 129–142.
7. *Значко-Яворский, И. Л.* К истории развития отечественной цементной промышленности / И. Л. Значко-Яворский. — М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1954. — Вып. VIII. — С. 106–138.

8. *Значко-Яворский, И. Л.* Открытие искусственного гидравлического цемента в России и развитие производства гидравлических вяжущих веществ во второй половине XVIII — первой половине XIX в. Материалы по истории строительной техники. Вып. 1 : сб. статей / И. Л. Значко-Яворский. — М. : Госстройиздат, 1961. — С. 49–99.
9. *Значко-Яворский, И. Л.* Очерки истории вяжущих веществ: От древнейших времен до середины XIX века / И. Л. Значко-Яворский. — Л. : Изд-во АН СССР, 1963. — 496 с.
10. *Зубехин, А. П.* Визит королю Si / А. П. Зубехин, П. П. Гайджуров, М. М. Лось. — Ростов н/Д. : Кн. изд-во, 1991. — 224 с.
11. Обзор российского рынка цемента в 2018 года : [цементный бюллетень] // СМ ПРО. — 2018.
12. Обзор цементной отрасли стран Евразийского экономического союза / Ernst&Young. — 2017. — 42 с. — URL: <https://docplayer.ru/82703204-Obzor-cementnoy-otrasli-stran-evraziyskogo-ekonomicheskogo-soyuza.html> (дата обращения: 23.10.2019).
13. *Потапова, Е. Н.* История вяжущих материалов : учеб. пособие / Е. Н. Потапова. — СПб. : Лань, 2018. — 224 с.
14. *Потапова, Е. Н.* История технологий вяжущих материалов : учеб. пособие / Е. Н. Потапова. — М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2014. — 152 с.
15. Правительство Российской Федерации. Распоряжение от 10 мая 2016 г. № 868-р. Стратегия развития промышленности строительных материалов на период до 2020 года и дальнейшую перспективу до 2030 года. — URL: <http://static.government.ru/media/files/RnBfAw072e3tmmykU2lRh1LI1HaHeG0q.pdf> (дата обращения: 22.10.2019).
16. Российский рынок цемента: ситуация в январе–декабре 2017 г., события января 2018 г. // Амикрон-консалтинг. — 2018. — 31 янв. — 34 с.
17. Рынок цемента — 2018 : годовой отчет.
18. Цементное обозрение. Январь 2019 года / «Союзцемент». — М., 2019. — 6 с. — URL: <https://www.eurocement.ru/engine/documents/document15398.pdf> (дата обращения: 23.10.2019).
19. Цементное обозрение. Февраль 2019 года / «Союзцемент». — М., 2019. — 6 с. — URL: <https://www.eurocement.ru/engine/documents/document15574.pdf> (дата обращения: 23.10.2019).
20. Цементное обозрение. Март 2019 года / «Союзцемент». — М., 2019. — 6 с. — URL: <https://www.eurocement.ru/engine/documents/document15715.pdf> (дата обращения: 23.10.2019).

ПРОИЗВОДСТВО МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

Всеволод Михайлович Лапушкин

РГАУ-МСХА им. К. А. Тимирязева, доцент, кандидат биологических наук

Константин Васильевич Аксенчик

Череповецкий государственный университет, доцент,
кандидат технических наук

Андрей Станиславович Малявин

Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики»,
зам. начальника отдела химической и нефтехимической промышленности,
кандидат технических наук

ВВЕДЕНИЕ

Отрасль минеральных удобрений в России является системообразующей для российского химического комплекса. Отрасль включает производство всех видов агрохимического сырья (апатитовые концентраты, фосфориты, хлористый калий) и полного ассортимента минеральных удобрений — односторонних азотных и калийных, сложных и комплексных удобрений, в том числе органоминеральных удобрений и удобрений с микроэлементами.

В настоящее время в России имеются мощности по производству около 25 млн т минеральных удобрений (в пересчете на 100% питательных веществ).

Российские компании полностью обеспечены основным сырьем для производства всех видов минеральных удобрений, таким как природный газ, сера, апатитовый концентрат и хлористый калий. В 2017 г. объем выпуска минеральных удобрений составил 22,54 млн т питательных веществ. Это четвертый показатель в мире. На экспорт приходится около 70% этого объема, что составляет до 5% всего несырьевого неэнергетического экспорта России и 30% экспортной выручки российского химпрома.

СТРУКТУРА ОТРАСЛИ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

В современном понимании отрасль минеральных удобрений состоит из следующих производств:

- добыча и обогащение фосфатного сырья;
- добыча и обогащение калийного сырья;
- производство аммиака;
- производство неорганических кислот, используемых в производстве минеральных удобрений (серная, ортофосфорная, азотная);
- производство минеральных удобрений (азотных, фосфорных, калийных, смешанных, органоминеральных).

Также к отрасли удобрений причисляют производства сопутствующих продуктов: производство кормовых и технических фосфатов, очищенных кислот.

На рис. 13.1 показана структура отрасли минеральных удобрений, потоки сырьевых ресурсов и полупродуктов, взаимосвязь с другими отраслями и сырьевыми ресурсами (серым прямоугольником обозначены производства отрасли минеральных удобрений).

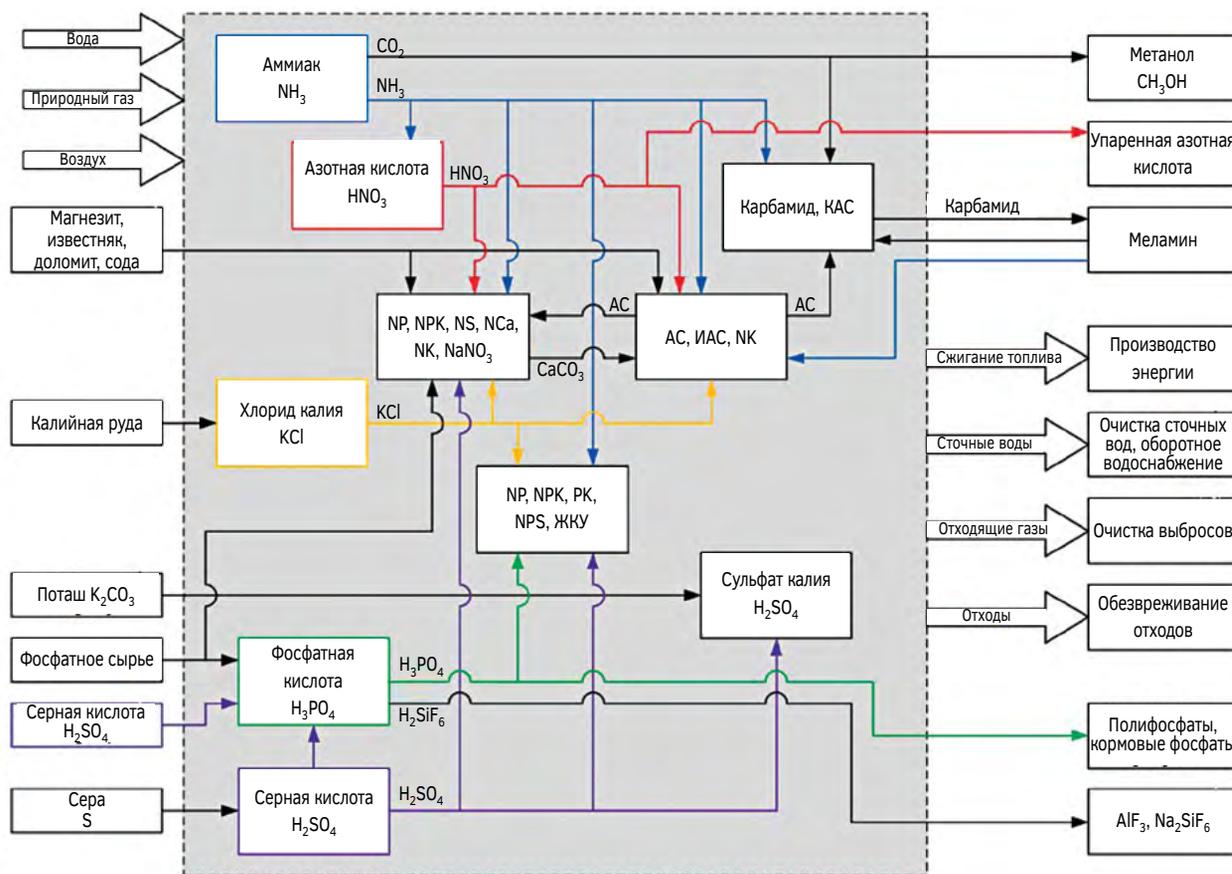


Рис. 13.1. Структура отрасли минеральных удобрений

ИСТОРИЯ ЗАРОЖДЕНИЯ ОТРАСЛИ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

Зарождение отрасли минеральных удобрений в мире

Представления о плодородии почвы и использовании различных приемов его сохранения и повышения зародились задолго до появления агрохимии как самостоятельной науки. С древних времен человек применял такие удобрения, как навоз, зола, известь, сидераты, гуано, но более детально к изучению вопроса питания растений человек подошел только в эпоху Возрождения.

В 1563 г. французский ученый Бернар Палисси писал: «Соль есть основа жизни и роста всех посевов. Навоз, который вывозят на поля, не имел бы никакого значения, если бы не содержал соли, которая остается от разложения сена и соломы. Если кто засекает поле несколько лет подряд, не уваживая его, то посевы извлекают из земли соль, необходимую для своего роста; земля, таким образом, обедняется солями и отказывается давать урожай. Разве вам не доводилось видеть, как некоторые земледельцы, перед тем как засеять тоже поле пшеницей на второй год, сжигают неизрасходованную солому, снятую ими с поля? В золе окажется та соль, которую солома поглотила из почвы: вернуть ее обратно — значит улучшить почву».

Первый вегетационный опыт по изучению питания растений был проведен в Брюсселе Яном Баптистом ван Гельмонтом около 1629 г. Высушенную в печке почву массой 200 фунтов он поместил в глиняный сосуд и посадил в нее ивовую ветвь весом 5 фунтов. В течение пяти лет Ван Гельмонт поливал сосуд с ивой дождевой или дистиллированной водой. По окончании опыта он снова высушил почву, взвесил и получил практически те же 200 фунтов, с которыми начинал опыт. В результате ван Гельмонт пришел к совершенно неверному выводу, что 169 фунтов, которые весили дерево, кора и корни, образовались из воды.

Таблица 13.1. Основные предприятия отрасли минеральных удобрений Российской Федерации

Номер на карте	Регион Российской Федерации	Город (населенный пункт)	Наименование организации	Наименование группы, ассоциации, холдинга	Производство
1	Республика Крым	Армянск	Титановые инвестиции, ООО — Армянский филиал	—	серная кислота; фосфорная кислота; NP/NPS-удобрения на основе сернокислотной переработки фосфатного сырья
2	Краснодарский край	Белореченск	ЕвроХим — Белореченские Минудобрения, ООО	МХК ЕвроХим, АО	серная кислота, фосфорная кислота; NP/NPS-удобрения на основе сернокислотной переработки фосфатного сырья
3	Калининградская область	Черняховск	Арви НПК, ООО	—	тройные удобрения NPK
4	Ставропольский край	Невинномысск	Невинномысский Азот, АО	МХК ЕвроХим, АО	аммиак жидкий технический; азотная кислота; NP/NPK-удобрения на основе сернокислотной переработки фосфатного сырья; аммиачная селитра; NK-удобрения; карбамид; КАС
					фосфорная кислота; моноаммонийфосфат (МАР); диаммонийфосфат (ДАР), фосфат калия
5	Воронежская область	Россошь	Минудобрения, АО г. Россошь	—	аммиак жидкий технический; азотная кислота; NP/NPK-удобрения на основе азотнокислотной переработки фосфатного сырья; аммиачная селитра.
6	Волгоградская область	Котельниково	«ЕвроХим — ВолгаКалий»	МХК ЕвроХим, АО	хлористый калий (производство не освоено)
7	Смоленская область	Верхнеднепровский	Дорогобуж, ПАО	Акрон, ОАО	аммиак жидкий технический; азотная кислота; NP/NPK-удобрения на основе азотнокислотной переработки фосфатного сырья; аммиачная селитра

Таблица 13.1 (продолжение)

Номер на карте	Регион Российской Федерации	Город (населенный пункт)	Наименование организации	Наименование группы, ассоциации, холдинга	Производство
8	Тульская область	Новомосковск	Новомосковская акционерная компания «Азот», АО	МХК Еврохим, АО	аммиак жидкий технический; азотная кислота; аммиачная селитра; известково-аммиачная селитра; карбамид; КАС
			Щекиноазот, ОАО	ОХК Щекиноазот, ООО	аммиак жидкий технический
9	Московская область	Воскресенск	Щекиноазот, ОАО — Ефремовский филиал	ОХК Щекиноазот, ООО	серная кислота; сульфат аммония
			Воскресенские минеральные удобрения, АО	ОХК Уралхим, АО	серная кислота; фосфорная кислота; NP/NPS/NPK-удобрения на основе сернокислотной переработки фосфатного сырья, в т. ч. очищенный фосфат аммония
10	Новгородская область	Великий Новгород	Акрон, ПАО	Акрон, ОАО	аммиак жидкий технический; азотная кислота; NP/NPK-удобрения на основе азотнокислотной переработки фосфатного сырья; аммиачная селитра; карбамид
11	Саратовская область	Балаково	Балаковский филиал АО «Апатит»	ПАО ФосАгро	минеральные удобрения: двойные — аммофос (MAP), диаммонийфосфат (DAP), сульфоаммофос (NPS) — различных марок; кормовые добавки: монокальцийфосфат; кислоты: серная кислота различных марок, олеум, осветленная фосфорная кислота; прочая продукция: кремнефтористый натрий для промышленности строительных материалов, фторирования питьевой воды; фосфогипс для сельского хозяйства и строительства

12	Ленинградская область	Волхов	Волховский филиал АО «Апатит»	ПАО ФосАгро	минеральные удобрения РК, NPK, сульфат калия, калимаг; триполифосфат натрия (порошок, гранулы, окрашенный); кислоты — серная кислота, фосфорная; сульфат алюминия жидкий
		Кингисепп	Промышленная группа «Фосфорит», ООО	МХК ЕвроХим, АО	
13	Самарская область	Тольятти	КуйбышевАзот, ПАО	—	аммиак жидкий технический; азотная кислота; аммиачная селитра; карбамид; сульфат аммония
		Тольятти	ТольяттиАзот, ПАО	—	аммиак жидкий технический; карбамид
14	Вологодская область	Череповец	АО «Апатит» (Вологодская область)	ПАО ФосАгро	кислоты: серная, фосфорная, азотная; аммиак жидкий технический; минеральные удобрения: двойные удобрения NP — аммофос (MAP); диаммонийфосфат (DAP); сульфоаммофос различных марок, тройные удобрения — диаммофоска (10:26:26), NPK 13-19-19, NPK 15-15-15, NPK 10-20-20 и другие марки; жидкие комплексные удобрения 11-37, аммиачная селитра (AN), сложное азотно-фосфорное (САФУ) NP 32-5; карбамид; фторид алюминия (AlF3)
		Буй	«Буйский химический завод» ОАО	—	смешанные двойные, тройные и органоминеральные удобрения различных марок, в т. ч. с микроэлементами
16	Республика Татарстан	Менделеевск	АО «Аммоний»	—	аммиак жидкий технический; азотная кислота; аммиачная селитра; карбамид

Таблица 13.1 (окончание)

Номер на карте	Регион Российской Федерации	Город (населенный пункт)	Наименование организации	Наименование группы, ассоциации, холдинга	Производство
17	Республика Башкортостан	Салават	Газпром нефтехим Салават, ООО	Газпром, ПАО	аммиак жидкий технический; карбамид
		Мелеуз	Мелеузовские минеральные удобрения, АО	—	азотная кислота; аммиачная селитра
18	Кировская область	Кирово-Чепецк	Филиал «КЧХК» АО «ОХК «УРАЛ-ХИМ» в городе Кирово-Чепецке	ОХК Уралхим, АО	аммиак жидкий технический; азотная кислота; NP/NPK-удобрения на основе азотнокислотной переработки фосфатного сырья; нитрат калия; аммиачная селитра; известково-аммиачная селитра; азотосульфат; кальций азотосульфат
					апатитовый концентрат с содержанием P_2O_5 не менее 39,0; нефелиновый концентрат с содержанием Al_2O_3 не менее 28,0% ($28,5 \pm 0,5\%$); сиенитовый алюмощелочной концентрат с содержанием Al_2O_3 не менее 26,0%; сфеновый концентрат; эгириновый концентрат; титаномагнетитовый концентрат; алюмокремниевый коагулянт-флокулянт (АККФ); дубитель для кож титановый; сорбент титано-фосфатный
19	Мурманская область	Ковдор	ОАО «Ковдорский ГОК»	МХК ЕвроХим, АО	апатитовый концентрат; бадделеитовый порошок; железорудный концентрат
					апатитовый концентрат
		Кировск	АО «Северо-Западная Фосфорная Компания»	Акрон, ОАО	апатитовый концентрат

20	Пермский край	Березники	Филиал «Азот» АО «ОХК «УРАЛХИМ»	ОХК Уралхим, АО	аммиак жидкий технический; азотная кислота; аммиачная селитра, в т. ч. пористая; НК-удобрения; карбамид
		Перь	Филиал «ПМУ» АО «ОХК «УРАЛХИМ» в городе Перми	ОХК Уралхим, АО	аммиак жидкий технический; карбамид
		Березники	Уралкалий, ПАО	Уралкалий, ПАО	хлористый калий; хлористый натрий
		Усолье	Усольский калийный комбинат	МХК ЕвроХим, АО	хлористый калий (освоение производства); хлористый натрий
21	Кемеровская область	Березники	ЗАО «Верхнекамская Калийная Компания»		хлористый калий (производство не освоено); хлористый натрий
		Кемерово	Азот, Кемеровское АО	СДС Азот, АО	аммиак жидкий технический; серная кислота; азотная кислота; аммиачная селитра; карбамид
		Кемерово	Капролактамы Кемерово, ЗАО	СДС Азот, АО	серная кислота; сульфат аммония
		Ачинск	РУСАЛ Ачинский глиноземный комбинат, ОАО*	РУСАЛ	сульфат калия
22	Красноярский край	Ачинск	Ангарский азотно-туковый завод, ООО	СДС Азот, АО	аммиак жидкий технический; азотная кислота; аммиачная селитра
23	Иркутская область	Ангарск			

* Сопутствующее производство.

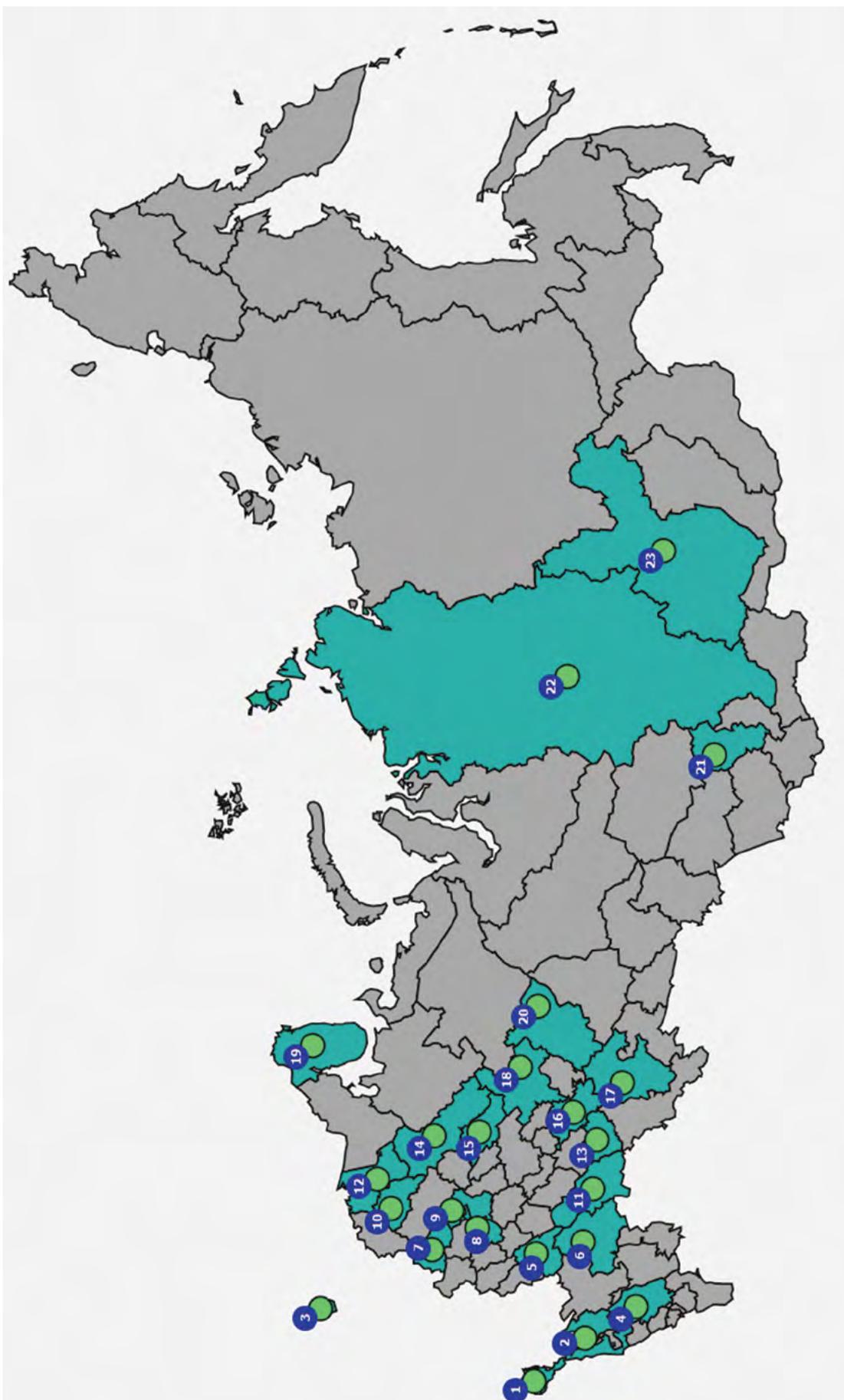


Рис. 13.2. Карта-схема расположения производств минеральных удобрений Российской Федерации

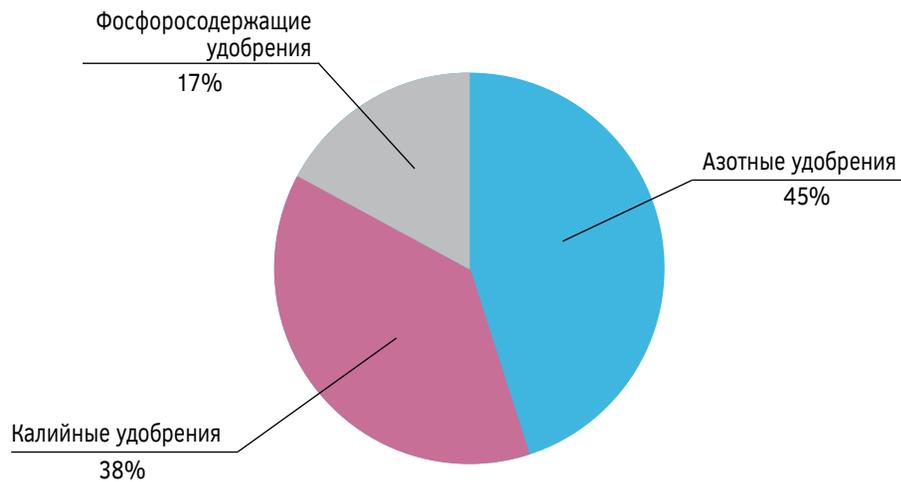


Рис. 13.3. Структура производства минеральных удобрений

К аналогичному выводу пришел и известный английский ученый Роберт Бойль, повторивший опыт ван Гельмонта с тыквой: «Вещества, образующиеся в процессе роста, растение создает само внутри своего тела загадочной и мистической “силой жизни”, вложенной в него творцом».

В 1699 г. Джон Вудворд сделал доклад о своих опытах с мятой, которую он выращивал в дождевой, речной и сточной воде. Масса мяты, выращенной на дождевой воде, составила 17 г, на речной — 139 г и на сточной — 284 г. На основе полученных результатов он сделал правильный вывод, что растение образуется не из воды, как думал ван Гельмонт, а из «особого землистого вещества». Это был первый точный опыт, в котором было доказано значение зольных веществ для развития растений.

Об удобрительном свойстве селитры говорил немецкий химик Иоганн Глаубер: «Селитра есть основа роста всех растений». Он рекомендовал вносить ее в почву под виноградники и смачивать раствором селитры посевное зерно для увеличения урожая.

Серьезный вклад в начальное развитие агрохимии внес французский химик Антуан Лавуазье. Однако его работы по питанию растений были обнаружены лишь спустя полвека после смерти ученого. В них уже начала формироваться теория минерального питания растений: «Животные питаются растениями или другими животными, которые, в свою очередь, питались растениями, так, что вещества, из которых они состоят, всегда почерпнуты из воздуха и из минерального царства, а брожение, гниение и горение постоянно возвращают атмосфере и минеральному царству те элементы, которые растения и животные из него заимствовали».

В 1761 г. Юхан Валлериус в книге «Основы земледельческой химии» дал понятие о гумусе как разложившемся органическом веществе. Связал продуктивность посевов с содержанием органического вещества в почве. Он заложил основы теории гумусового питания растений, ошибочно полагая, что растения синтезируют необходимые им вещества из гумуса, воды и воздуха. Минеральные же соли, в том числе селитра, по мнению Валлериуса, играют лишь второстепенную роль в качестве «растворителя» гумуса.

Важное значение теории гумусового питания придавал в своей книге «Химические исследования жизнедеятельности растений» швейцарский ученый Николо де Соссюр. Несмотря на явное заблуждение в источниках питания растений, ему принадлежит особая роль в разработке учения о воздушном питании растений. Он впервые установил, что в темноте растения поглощают кислород, выделяя углекислый газ, а на свету усваивают углерод углекислоты с выделением кислорода, и доказал тем самым, что не почва, а воздух является источником углерода для растений.

Ярым сторонником теории гумусового питания был немецкий ученый Альбрехт Тэер. Он писал: «Плодородие почвы зависит, собственно, целиком от гумуса, так как кроме воды он представляет единственное вещество почвы, могущее служить питанием растениям». Своим авторитетом он более 60 лет тормозил развитие вопроса о питании растений. Теория гумусового питания растений господствовала в Европе до 1840 г.

Немецкий ученый Карл Шпренгель в своих книгах «Учение о почве» (1837), «Учение о пашне» (1838) и «Учение об удобрении» (1839) довольно верно изложил свои представления о минеральном питании растений и применении удобрений. «Растения из неорганических веществ, получаемых ими из почвы и воздуха, образуют тела органические с помощью света, тепла, электричества и влаги...» «Воздух остается всегда одинаковым по своему составу, но нельзя сказать того же о почве; поэтому необходимо возмещение утраченного ею, причем нужно обращать внимание на так называемые минеральные вещества, чем на кислород, углерод и водород, т. к. эти последние растения находят в воздухе; что же касается азота, то он должен быть также внесен в связанной форме, т. к. большинство растений не имеет способности притягивать достаточно азота листьями...»

В конце 30-х гг. XIX в. гумусовая теория питания была подвергнута жесткой критике со стороны двух основателей современной агрохимии — Ж. Б. Буссенго во Франции и Ю. Либиха в Германии.

Юстус фон Либих ввел новые методы анализа органических веществ, методы сжигания, усовершенствовал и упростил лабораторное оборудование. Проводил исследования белковых веществ, органических кислот, алкалоидов, жиров. Внедрил метод гидролиза сложных молекул.

Важное значение имеют синтезированные Либихом органические вещества, поскольку ранее это считалось невозможным: «Природа создает, химия разрушает». Особый вклад Ю. Либих внес в развитие применения удобрений.

В своей книге «Химия в приложении к земледелию и физиологии растений» (1840) Либих писал: «Придет время, когда каждое поле сообразно с растением, какое на нем имеют в виду разводить, будет удобряться свойственным удобрением, приготовленным на химических заводах, тогда удобрение будет состоять только из тех веществ, которые нужны для питания растений».

Основной заслугой Ю. Либиха в агрохимии является разработка учения о минеральном питании растений:

- Пищей всех растений являются неорганические (минеральные) вещества.
- Растения питаются аммиаком, углекислотой, азотной кислотой, водой, фосфорной и серной кислотой, кремнекислотой, известью, магнезией, калием, натрием, железом, некоторые растения нуждаются в поваренной соли.
- Перегной является источником углекислоты, которая ускоряет процесс выветривания силикатов и подготавливает минеральную пищу для растений.
- Навоз и другие органические удобрения не являются пищей для растений, а оказывают свое действие косвенно, благодаря содержащимся в них элементам питания, освобождающимся после гниения.
- Ни одно растение не обогащает почву элементами питания, а истощает ее. Современное земледелие грабительское, грабительские хозяйства, грабительские крестьяне.
- Чередование культур только замедляет истощение почвы, позволяет более равномерно использовать запасы питательных веществ в ней.
- Для систематического получения хороших урожаев необходимо возвращать элементы питания в почву.
- Нельзя заменить элементы питания друг другом.
- Урожайность растений определяется элементом питания, находящимся в минимуме.
- Если почва подходящая, если она содержит достаточное количество щелочей, фосфатов и сульфатов, то ничего больше не требуется. Растения будут готовы извлекать нужный им аммиак из атмосферы так же, как они берут углекислоту.

С большой энергией Либих настаивал на необходимости возврата минеральных веществ в почву и приписывал этому большое историческое значение: «Причина возникновения и падения наций лежит в одном и том же. Расхищение плодородия почвы обуславливает их гибель; поддержание этого плодородия — их жизнь, богатство и могущество». В качестве примера он указывал на судьбу Греции и Рима, пришедших к упадку из-за незнания законов природы. Теми же последствиями Либих грозил и современному обществу, если оно не прекратит расхищение питательных веществ почвы.

Совершенно точно охарактеризовав значение фосфора, калия и других зольных элементов, Либих не уделял должного внимания азотным удобрениям. Ему, конечно, было известно о роли азота в формировании белковых соединений, но он полагал, что для нормального обеспечения растений азотом достаточно содержания аммиака в воздухе (в виде углекислой и других солей). В связи этим он считал приобретение натриевой селитры и аммонийных солей пустой тратой денег.

Одним из основоположников агрохимии как самостоятельной науки наряду с Либихом считается профессор Лионского университета Жан Батист Буссенго. В отличие от Либиха, Буссенго непосредственно проводил вегетационные и полевые опыты и в 1837–1838 гг. показал, что «наибольшее действие оказывают те удобрения, которые содержат больше азота». Пренебрежительное отношение Либиха к азотным удобрениям вызывало у Буссенго глубокое возражение. В 1851 г. в опытах по выращиванию растений в стеклянных сосудах в атмосфере без азота он наглядно показал, что воздух не может быть источником этого элемента для питания растений, которые требуют наличия в почве минерального азота. Ж. Б. Буссенго впервые ввел в агрономию количественные методы химического анализа, что дало возможность изучать содержание, баланс и круговорот элементов питания в земледелии и строго подойти к оценке почвенного плодородия. Еще в 1836–1840 гг. он начал изучать баланс элементов питания в севообороте.

В своих опытах с зерновыми и бобовыми культурами Буссенго установил, что бобовые культуры не способствуют накоплению азота в стерильных условиях.

Лишь в 1886 г. немецкому ученому Герману Гельригелю после проведения многочисленных опытов удалось сделать вывод, что на развитие бобовых культур оказывают влияние содержащиеся в почве бактерии, и бобовые растения, заражаясь ими в молодом возрасте, образуют клубеньки и получают возможность усваивать молекулярный азот атмосферы.

Зарождение отрасли минеральных удобрений в России

В России развитие естествознания в целом тесно связано с именем М. В. Ломоносова. В 1753 г. в своей работе «Слово о явлениях воздушных» он писал: «Преизобильное рощение тучных дерев, которые на бесплодном песку корень свой утвердили, ясно изъявляет, что жирными листьями жирный тук из воздуха впитывают». В книге «О слоях земных» он писал о происхождении гумуса почвы: «Нет сомнения, что чернозем не первообразная и не первозданная материя, но произошел от согнтия животных и растущих тел со временем».

М. В. Ломоносов первым применил микроскоп для изучения растений. Определил химический состав отдельных лекарственных растений, изучал вопросы физиологии растений. Выступал против господствующей в то время водной теории питания растений. По настоянию Ломоносова, в год его смерти, в 1765 г., Екатерина II утвердила образование Вольного экономического общества, которое стало первой в России добровольной научно-хозяйственной организацией, объединявшей ученых в области естествознания, сельского хозяйства и других наук и в течение 150 лет играло большую роль в развитии агрономии в России.

В 1766 г. был организован журнал «Труды ВЭО», в котором публиковались работы по плодородию почв, питанию растений и применению органических удобрений. На его страницах А. Т. Болотов писал о необходимости внедрения севооборотов и применения всех

видов органических удобрений, в том числе на черноземах, описал основы минерального питания растений.

Большое значение применению навоза, компостов и известкованию почв придавал И. М. Ковов: «Известь глинистую почву делает не только рыхлой, но и всякую кислоту, в глинистой по большей части земле находящуюся, истребляет». Задолго до работ Тэера он описал основы гумусовой теории питания растений, говорил о роли воздушного питания.

Опередив Ю. Либиха, в 1809 г. А. П. Пошман писал в своей книге «Наставление о приготовлении сухих и влажных туков, служащих к удобрению наших полей»: «В удобрении действующим началом являются щелочно-солевые вещества, содержащиеся в навозе и золе, т. е. минеральные вещества служат пищей для растений».

Первым русским агрохимиком можно считать А. Н. Энгельгардта, которым в 1866 г. были проведены исследования залежей фосфоритов в различных губерниях Российской империи и возможности их применения в качестве фосфорных удобрений.

Первые полевые опыты с удобрениями были заложены под руководством Д. И. Менделеева в Смоленской, Петербургской, Московской и Симбирской губерниях. В 1866 г. была опубликована его работа «Об организации сельскохозяйственных опытов при Вольном Экономическом обществе», а уже в 1872 г. — «Отчет о сельскохозяйственных опытах 1867–1869 гг.». По результатам опытов, Менделеев указывал на необходимость известкования кислых почв, применения фосфоритной муки, суперфосфата, азотных и калийных удобрений совместно с навозом.

Основоположником отечественной агрохимической школы по праву считается Д. Н. Прянишников. В 1892 г. им была сформулирована и доказана научно обоснованная теория азотного питания растений, основанная на вегетационных опытах и химических анализах. По инициативе Д. Н. Прянишникова в России начали организовывать агрохимические опытные станции, научно-исследовательские институты и самостоятельные кафедры агрохимии, начала свое развитие туковая промышленность. Начиная с 1927 г. под руководством Прянишникова в 300 пунктах нашей страны было проведено более 3800 опытов с удобрениями.

ЭВОЛЮЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ И ЦИКЛЫ РАЗВИТИЯ ОТРАСЛИ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

При описании развития человечества переход от собирательства и охоты к целенаправленному земледелию выделен как основной цикл становления современной цивилизации. В плане умения собирать пропитание и охотиться человек мало отличается от животного, а вот умение целенаправленно выращивать необходимые культуры легло в основу развития человеческого общества: закрепило отдельные племена на ограниченных территориях, явилось основой создания определенных общественных структур, ремесел, развития орудий труда и т. д. Умение возделывать почву и ее плодородие являлись основными факторами успешности отдельных поселений.

С самых ранних пор земледелия стали развиваться и методы повышения урожайности: выбор и подготовка почвы для посева (целенаправленное сжигание леса кроме расчистки посевных площадей давал также определенный эффект повышения урожайности за счет получающейся золы), рыхление, полив, чередование посевных площадей и т. д.

Во второй половине XIX в. были разработаны системы классификации почв по их плодородию, а также установлено, что производительность почв зависит как от природных свойств почв, так и от вложенного труда. Агрохимические опыты подтверждали вынос определенного количества вещества из почвы с сельскохозяйственной продукцией. Как только были определены эти вещества (преимущественно азот, фосфор, калий), начались попытки восполнить их содержание в почве внесением извне. Этот момент можно считать началом производства удобрений.

В первом цикле в качестве удобрений использовали природное минеральное сырье: чилийскую селитру (нитрат натрия), фосфоритную муку (фосфаты кальция), калимагнезию, страссфуртские съёмочные соли (калийсодержащие соли) и вторичные / побочные продукты других производств — томасшлак (фосфаты), сульфат аммония (от металлургических производств), золу и др. Производство и применение данных видов удобрений активно развивалось в XIX в. и характеризовалось относительно простыми методами добычи и получения товарных форм: открытая добыча, растворение — кристаллизация (для чилийской селитры), помол (для фосфоритной муки) и использование необработанных вторичных ресурсов.

Таким образом, сырьевые ресурсы производства удобрений и ассортимент были достаточно ограниченными, монополизированными с сильной географической неравномерностью.

Дальнейшее развитие производства удобрений было обусловлено поиском доступных удобрений, необходимостью увеличения их эффективности (растворимости, содержание основного вещества), расширения ассортимента и сырьевой базы удобрений.

Второй цикл развития производств удобрений характеризуется использованием целенаправленного химического синтеза минеральных удобрений, а также методов обогащения / облагораживания сырья. Формируется отрасль *производства* минеральных удобрений: для увеличения доступности фосфора используют серноокислотное разложение фосфатного сырья с получением простого суперфосфата; в результате поиска доступного источника азота в 1907–1909 гг. открыт метод связывания атмосферного азота с получением аммиака и уже в 1913 г. в Германии пущено первое производство аммиака (в России — в 1927 г.), а затем и аммиачной селитры. В начале XX в. на территории России открыты крупные месторождения фосфатного сырья (1921 г. — апатитовые руды в Хибинах) и калийных руд (1925 г. — верхнекамское месторождение калийных руд).

Эти и другие открытия сделали удобрения более доступными для широкого круга потребителей. Агрохимические исследования подтверждали высокую эффективность применения удобрений, было установлено положительное влияние совместного применения различных питательных веществ.

Дальнейшие исследования, обусловленные прежде всего агрохимическими потребностями, были направлены на увеличение содержания питательных веществ и получение комплексных удобрений с содержанием двух или трех питательных веществ в одной грануле (**третий цикл**):

- с развитием технологий производства фосфорной кислоты вместо простого суперфосфата, содержащего 15–20% P_2O_5 усв., начали разрабатываться технологии фосфорноокислотного разложения фосфатного сырья с получением двойного суперфосфата с содержанием 42–49% P_2O_5 усв.;
- широкое развитие технологий производства экстракционной фосфорной кислоты и аммиака привели к распространению производств NP-удобрений — аммофоса (производство освоено в 1963 г. в Джамбуле, Казахстан), сульфоаммофоса, диаммонийфосфата, а затем и тройных NPK-удобрений широкого ассортимента ряда. Со временем цеха двойного суперфосфата модернизируют под производство аммофоса и диаммонийфосфата (более технологичные азотно-фосфорные удобрения, содержащие большее количество питательных веществ, чем двойной суперфосфат);
- наряду с серноокислотным разложением начинается применение азотноокислотного разложения фосфатного сырья, позволяющего получать широкий ассортиментный ряд NP/NPK-удобрений, содержащих две формы азота (аммонийную и нитратную). Реализуются процессы с применением совместной нейтрализации смеси азотной и фосфорной кислот с получением NP/NPK-продуктов (первое в СССР производство нитрофоски в 1962 г. нитроаммофоски в 1970 г.).

Развитие производства удобрений в России показано на рис. 13.4.

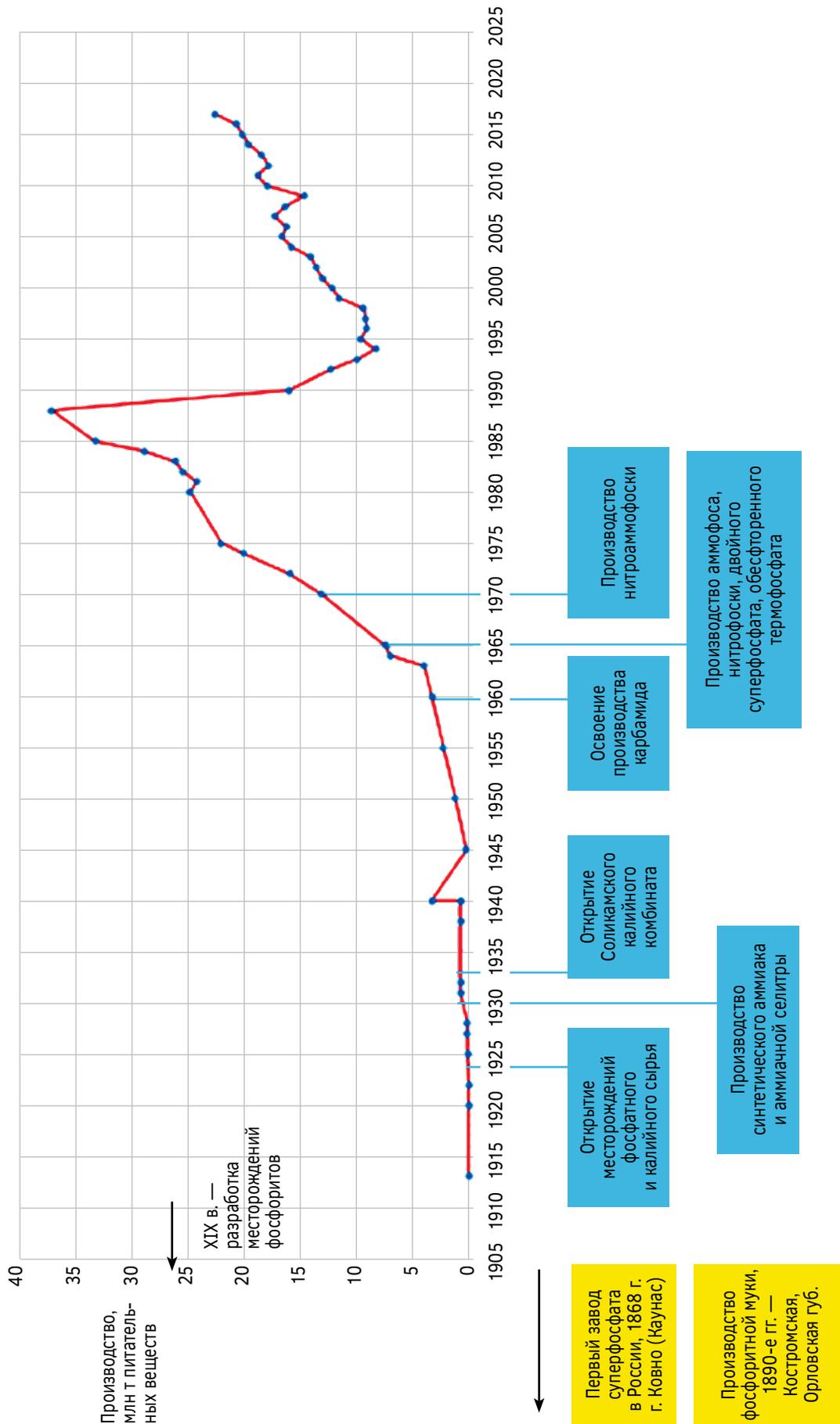


Рис. 13.4. Развитие производств удобрений в России

Обозначенные на момент 70–80 гг. XX в. тенденции истощения природных ресурсов, удорожания энергоносителей и ужесточения требований к охране окружающей среды коснулись и отрасли удобрений. Дополнительными факторами явились глобализация и развитие международной торговли удобрениями, а следовательно, на первый план вышли вопросы эффективности производства. При этом экономическая эффективность (необходимая для успешной конкуренции) дополняется ресурсоэффективностью, энергоэффективностью, и экологической эффективностью (имеющими как экономический, так и социальный и экологический аспекты) (**четвертый цикл развития**).

В рыночных условиях географическое расположение производств, наличие сырьевой базы, эффективность использования ресурсов при производстве и потреблении удобрений, гибкость технологических схем, широкий ассортиментный ряд и другие факторы определяют основные конкурентные преимущества производителей удобрений.

В сложившейся ситуации ключевыми показателями становятся ресурсоэффективность и экологическая эффективность производства и применения удобрений:

- ресурсоэффективность производства определяется комплексным использованием сырья с точки зрения расширения ассортиментного ряда не только удобрений, но и смежных продуктов (тепловая и электрическая энергия, технические и пищевые фосфаты, фториды и кремнефториды, соли и кислоты улучшенного качества, технические газы, строительные материалы, редкоземельные элементы и др.); снижением потерь сырья и продуктов в процессе производства, транспортировки и потребления; большее значение приобретают такие качественные характеристики удобрений, как гранулометрический состав, прочность гранул, растворимость, слеживаемость, пылимость, и т. д.;
 - ресурсоэффективность применения удобрений заключается в оптимизации процессов минерального питания растений (дозы и технические способы внесения удобрений), использовании более эффективных форм удобрений (двойные и тройные удобрения с микро- и мезоэлементами, стимуляторами роста, биоудобрения, удобрения пролонгированного действия, жидкие удобрения, водорастворимые удобрения для гидропоники и т. д.) с достижением необходимого результата при меньшей затрате сырьевых ресурсов;
 - снижение негативного воздействия на окружающую среду при производстве и потреблении удобрений определяет **экологическую эффективность**. Экологическая эффективность применения удобрений обусловлена как положительными, так и отрицательными факторами:
 - отрицательные факторы применения удобрений могут быть обусловлены несовершенством технологии транспортировки и хранения, тукосмешения и внесения удобрений; нарушением агрономической технологии применения под различные культуры, несовершенством свойств удобрений (содержание вредных веществ, пылимость, растворимость и вымываемость компонентов из плодородного слоя), изменением свойств почвы и ухудшением свойств сельскохозяйственной продукции при неправильном внесении;
 - положительными факторами применения удобрений являются воспроизводство плодородия почв, улучшение ее характеристик, получение сельскохозяйственной продукции оптимальной по химическому составу и питательной ценности;
 - **энергоэффективность** (как часть ресурсоэффективности) заключается в эффективном использовании энергоресурсов, в том числе вторичных, в производстве удобрений: использовании тепла производственных процессов: сжигание серы и утилизация тепла абсорбции в производстве серной кислоты, использование тепла реакции нейтрализации для удаления влаги в производстве аммиачной селитры и фосфатов аммония, оптимизация процессов сушки с целью снижения потребления природного газа и др.
- Схематично циклы развития технологий удобрений показаны на рис. 13.5.

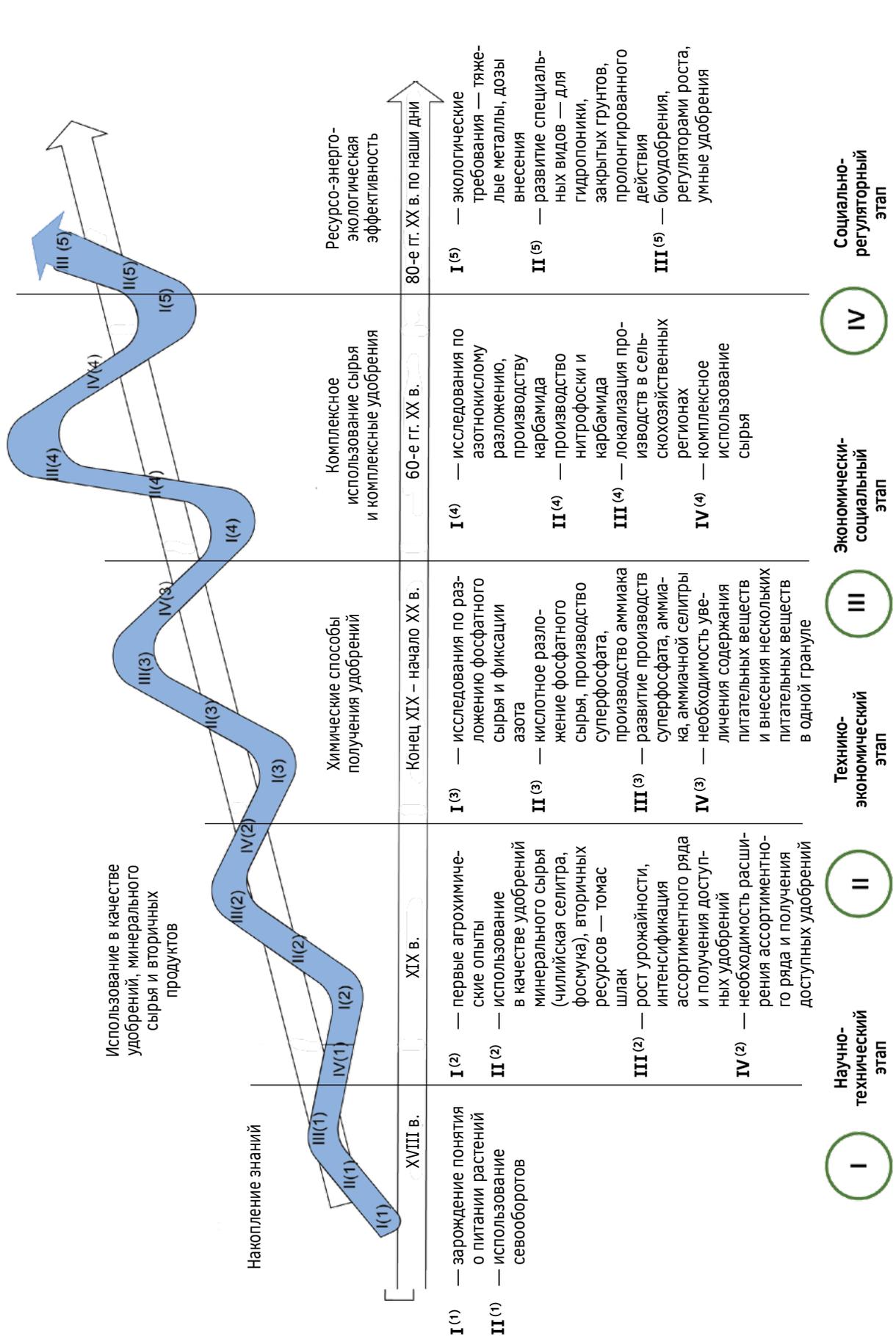


Рис. 13.5. Эволюция технологий отрасли удобрений

Условно развитие отрасли удобрений можно разбить на следующие циклы:

- **предварительный цикл** — накопление знаний;
- **первый цикл** — использование в качестве удобрений минерального сырья и вторичных ресурсов;
- **второй цикл** — химические способы получения удобрений;
- **третий цикл** — комплексное использование сырья и комплексные удобрения;
- **четвертый цикл** — ресурсо-, энерго- и экологическая эффективность производства и применения минеральных удобрений.

Чередование данных циклов можно представить в виде спирального развития с циклическим прохождением следующих этапов: научно-технического, технико-экономического, экономически-социального, социально-регуляторного, и далее цикл повторяется.

Движущими силами выделенных этапов являются внутренние (внутриотраслевые) и внешние факторы (рис. 13.6).



Рис. 13.6. Основные этапы технологических циклов развития отрасли минеральных удобрений

1. Фактором развития научно-технического этапа является необходимость удовлетворения потребности в техническом и технологическом развитии производства (потребность в новых видах удобрений, технике и технологиях). Внешними факторами при этом являются необходимость обеспечения продовольствием, агрохимическая потребность, уровень развития науки и техники. Результатами ее реализации является разработка новой техники и технологий.

2. Внедрение в промышленности результатов научно-технического этапа (новой техники и технологий) определяет технико-экономический этап. Внутренними факторами развития является последовательное улучшение (достижение лучших показателей энергоэффективности, ресурсоэффективности); расширение ассортиментного ряда; создание «гибких» технологических схем; расширение сырьевой базы. Извне на данный этап влияют уровень развития смежных отраслей (машиностроения, приборостроения, конструкционных материалов — стали и сплавы, композиты и полимеры и т. д.), появление новых видов сырьевых ресурсов. Результатом является внедрение новой техники или технологии с получением технической и/или экономической выгоды.

3. Дальнейшее освоение новых технологий и их повсеместное использование оказывает влияние не только на экономическую, но и на социальную сферу предприятия, региона, государства, тем самым определяя экономически-социальный этап развития.

Так, например, широкое распространение средств химизации сельского хозяйства является одним из определяющих факторов повышения урожайности сельскохозяйственных культур и в то же время служит стимулом развития научно-технической базы, машиностроения, приборостроения, логистики, инфраструктуры, торговли и т. д.

Рыночная среда и механизмы, обеспеченность ресурсами, общественная значимость и общественное внимание также оказывают влияние на развитие данного этапа.

4. Социально-регуляторный этап реализуется под действием международного, национального, общественного регуляторных механизмов. Основными факторами, влияющими на развитие производства на данном этапе, являются повышение экологической эффективности технологий; необходимость улучшения качества и потребительских свойств удобрений; имиджевая составляющая (популяризация экологически чистых, бесхлорных удобрений, органоминеральных, с микроэлементами, регуляторами роста и биоудобрения), повышение промышленной безопасности. Реализация социально-регуляторного этапа заканчивается формированием запроса на создание новых технологий.

Примерами влияния регуляторных механизмов на развитие отрасли удобрений можно считать: ужесточение требований к содержанию тяжелых металлов, радионуклидов и других загрязняющих веществ, постоянное ужесточение требований к энергоэффективности, ресурсоэффективности и экологической эффективности при разработке новых и модернизации существующих производств, формирование требований к качеству удобрений и др.

Таким образом, стремление предприятий соответствовать вновь сформированному запросу общества ведет к необходимости запуска нового цикла развития.

ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ОТРАСЛИ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

Существующие в Российской Федерации технологии производства удобрений можно разделить по видам производимой продукции:

1. Односторонние удобрения:

- *азотные*: аммиачная селитра, известково-аммиачная селитра, карбамид, карбамидно-аммиачная смесь (КАС), сульфат аммония, нитрат кальция, азотосульфат, кальцийазотосульфата;
- *фосфатные*: фосфоритная мука, простой суперфосфат, двойной суперфосфат, термические фосфаты;
- *калийные*: хлористый калий, сульфат калия;

2. Комплексные удобрения:

- *на основе сернокислотной переработки фосфатного сырья*: производство NP/NPS-удобрений — аммофос, диаммонийфосфат, сульфоаммофос; производство PK/NPK-удобрений, жидких комплексных удобрений (ЖКУ);
- *на основе азотнокислотной переработки фосфатного сырья*: NP/NPK-удобрения — нитрофоска, нитроаммофоска, азофоска;
- *на основе обменных процессов*: азотно-калийные удобрения.

Различие в технологиях производства удобрений определяется применением различных способов:

- обогащение (фосфоритная мука, хлористый калий);
- кислотное разложение фосфатного сырья (сернокислотное — простой суперфосфат; фосфорнокислотное — двойной суперфосфат, азотнокислотное — NP/NPK-удобрения, нитрат кальция);
- кислотное разложение калийного сырья (сернокислотное разложение — сульфат калия; фосфорнокислотное — фосфат калия);
- нейтрализация кислот или продуктов кислотного разложения фосфатного сырья (аммофос, диаммонийфосфат, NP/NPK/PK-удобрения, аммиачная селитра, сульфат аммония, сульфат калия);
- обменные / конверсионные процессы: нитрат калия, NK-удобрения, сульфат аммония,
- синтез: производство карбамида.

Основные стадии производства минеральных удобрений приведены в табл. 13.2.

Таблица 13.2. Стадии получения основных видов минеральных удобрений, производящихся в Российской Федерации

Основные виды минеральных удобрений	Добыча сырья	Обогащение	Взаимодействие реагентов	Разделение фаз	Нагревание, охлаждение	Кристаллизация	Выпаривание	Гранулирование	Сушка	Прокалка	Абсорбция	Измельчение, классификация	Смешивание
Фосфорные*													
Фосфоритная мука*	+	+ -							+		+	+	
Простой суперфосфат, двойной суперфосфат*			+					+	+ -		+	+	
Термические фосфаты										+	+	+	+
Комплексные фосфорсодержащие на основе серноокислотного разложения фосфатного сырья													
На основе серноокислотного разложения NP-, NPS-, NPK-, PK-удобрения			+		+		+ -	+	+		+	+	
Жидкие комплексные удобрения			+		+		+				+		
Комплексные фосфорсодержащие и азотные на основе азотнокислотного разложения фосфатного сырья													
NP-, NPK-удобрения на основе азотнокислотного разложения			+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Производство кальцийазотосульфата			+		+		+	+	+		+	+	+
Производство азотосульфата			+		+		+	+	+		+	+	+
Производство нитрата кальция			+	+	+	+	+	+	+		+	+	
Азотные удобрения на основе переработки аммиака и/или азотной кислоты													
Аммиачная селитра, известково-аммиачная селитра			+				+	+			+	+	+
Карбамид и КАС			+		+		+	+			+	+	
NK-удобрения			+	+	+	+	+		+		+		
Азотные удобрения на основе переработки серной кислоты и аммиака (или вторичный продукт производства капролактама)													
Сульфат аммония			+				+	+	+		+	+	+
Калийные удобрения													
Хлористый калий		+						+	+		+	+	+
Сульфат калия			+					+	+		+	+	+

* В данный момент не производятся.

Основное используемое оборудование в производстве комплексных удобрений представлено в виде групп, определяемых конструкцией аппаратов:

- реакторы-нейтрализаторы;
- выпарные аппараты;
- оборудование для гранулирования-сушки;
- оборудование узлов рассева-дробления;
- оборудование для охлаждения и кондиционирования продукта;
- газоочистное оборудование;
- прочее оборудование.

Группа реакторов представлена нейтрализаторами различных конструкций.

Аммонизация смеси кислот

- емкостные аппараты с перемешивающими устройствами (или каскады реакторов-смесителей);
- аппарат САИ — скоростной аммонизатор-испаритель;
- струйные / трубчатые реакторы (ТР).

Выбор типа аппарата зависит от нескольких факторов:

- исходное сырье: концентрация фосфорной кислоты (смеси кислот); характеристики используемых добавок (необходимость использования плава аммиачной селитры и его концентрация, магниальная добавка); наличие на промплощадке газообразного или жидкого аммиака;
- ассортиментный ряд продукции;
- аппаратурное оформление остальных стадий процесса (гранулирования и сушки, абсорбции);
- требуемая производительность технологической системы.

Емкостные аппараты с перемешивающими устройствами

Емкостные аппараты с перемешивающими устройствами (или каскады реакторов-смесителей) обычно представляют собой каскад из 2–3 нейтрализаторов-смесителей, в которых нейтрализация смеси кислот происходит газообразным (или жидким) аммиаком, подаваемым через барботажные трубы. Для лучшего осуществления процесса смешивания компонентов смесители оборудованы перемешивающими устройствами.

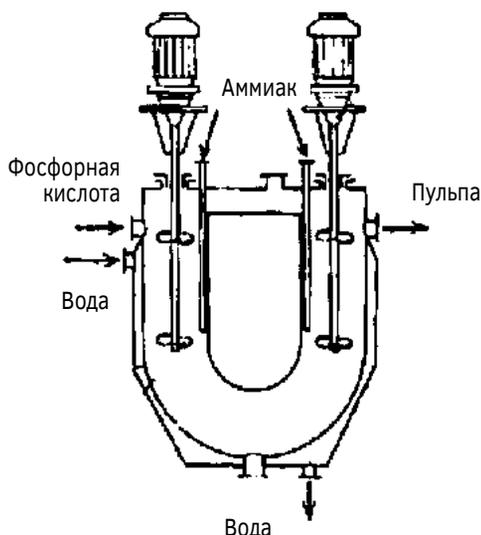


Рис. 13.7. U-образный реактор

Скоростной аммонизатор-испаритель (САИ)

САИ состоит из циркуляционного контура, включающего реакционную камеру и циркуляционную трубу, соединенные с центробежным сепаратором. Интенсивное перемешивание пульпы в САИ обеспечивается без использования механических устройств за счет энергии химической реакции, однако при использовании слабой ЭФК возможно применение циркуляционного насоса. Аммонизация в САИ очень концентрированных кислот затруднена из-за потери текучести пульпы.

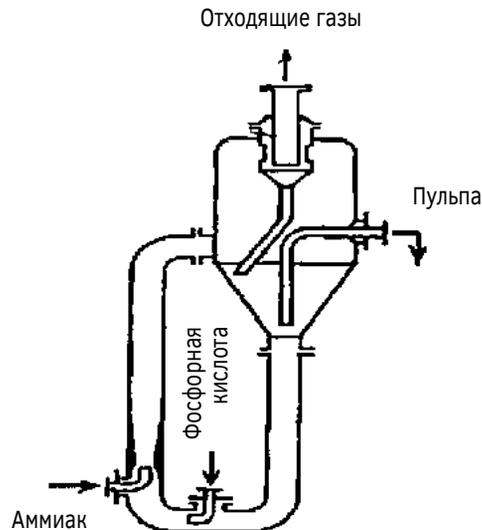


Рис. 13.8. Скоростной аммонизатор-испаритель (САИ)

Трубчатый реактор (ТР)

Трубчатый реактор (ТР) применяется для аммонизации смеси кислот повышенной концентрации (43–52% P_2O_5). Он состоит из камеры смешения и реакционной камеры. В камере смешения расположены сопло для введения аммиака и патрубок для подачи смеси кислот (возможна организация подачи и третьего потока в ТР — серной кислоты или абсорбционных сточных вод). Процесс аммонизации протекает с большой интенсивностью и сопровождается значительным увеличением температуры и давления внутри реактора. Образующиеся в камере пульпа, пары воды, а также непрореагировавший аммиак выбрасываются через форсунку наружу со скоростью до 30 м/с. За счет резкого падения давления происходит интенсивное самоиспарение влаги из пульпы. Это дает возможность получать после реактора продукт, содержащий всего 2–6% влаги, а в некоторых случаях получать удобрения практически без сушки.



Рис. 13.9. Трубчатый аммонизатор кислот

Выпарные аппараты

В некоторых производствах для концентрирования аммонизированных пульп используют выпарные установки.

Наибольшее распространение получили установки, работающие под вакуумом с использованием пара в качестве теплоносителя (рис. 13.10). Сохранились также установки, работающие при атмосферном давлении, которые используют тепло сгорания природного газа (выпарной аппарат с погружной горелкой; рис. 13.11).

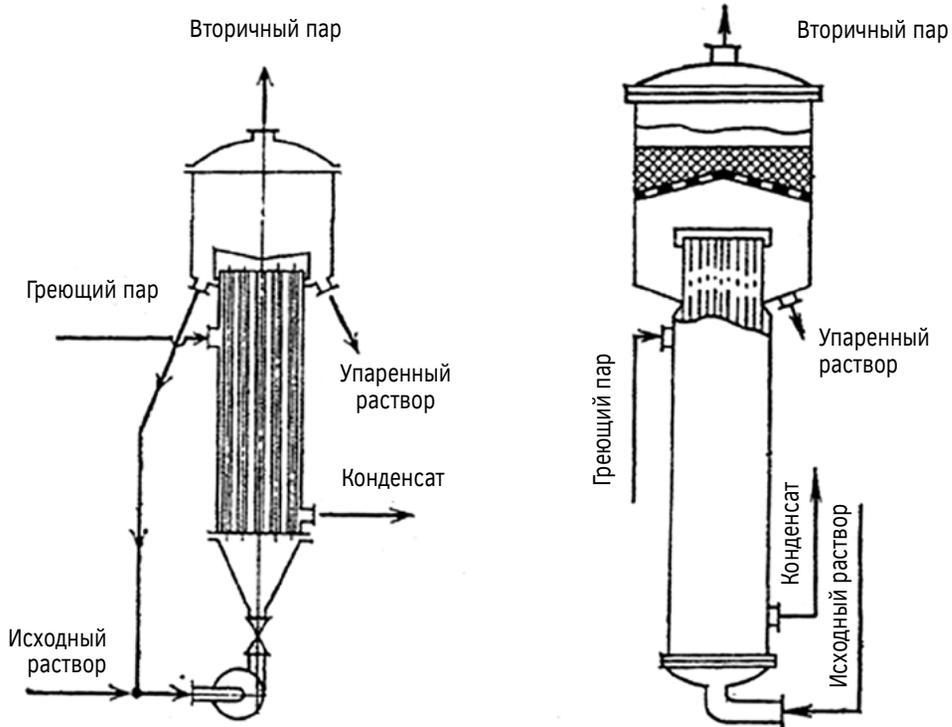


Рис. 13.10. Выпарной аппарат с принудительной циркуляцией

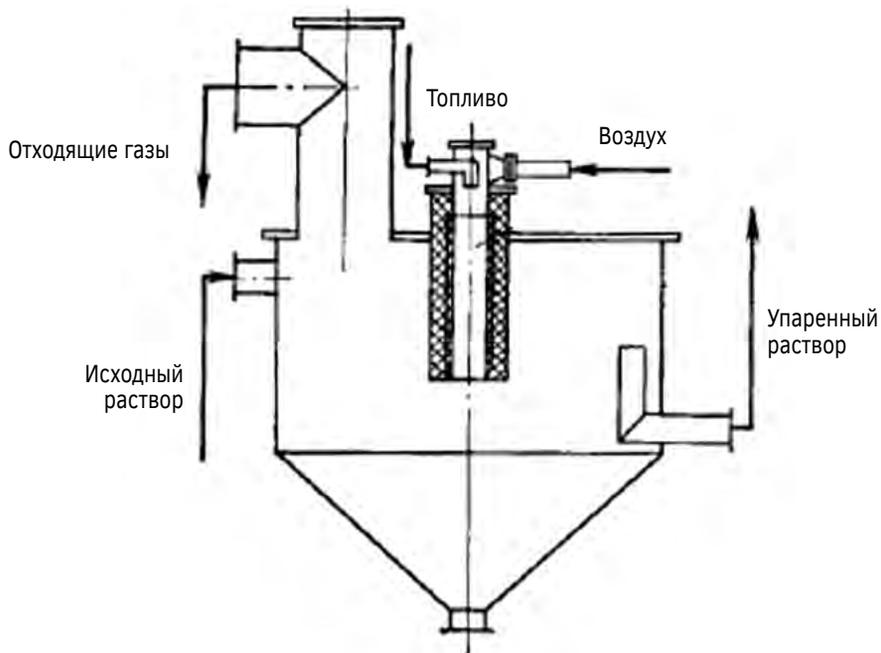


Рис. 13.11. Выпарной аппарат с погружной горелкой

Оборудование для гранулирования-сушки

Выбор метода гранулирования зависит от агрегатного состояния и физических свойств исходных веществ.

В настоящее время в производстве удобрений реализованы три принципиальных схемы производства гранулированного продукта: с аппаратом БГС, схема с АГ — СБ, схема с грануляционной башней, основанные на следующих методах гранулирования:

- распыливания (диспергирования) пульпы на поверхность частиц падающего слоя с одновременной сушкой продукта до требуемой влажности;
- окатывания;
- гранулирование из расплавов с кристаллизацией в твердые гранулы в процессе свободного падения в восходящем потоке охлаждающего воздуха.

Барабанный гранулятор-сушилка

Принцип работы БГС заключается в наслаивании тонких пленок жидкости на гранулы продукта (завесу) с одновременной сушкой. Внутри барабана на завесу направлен факел распыла перерабатываемой пульпы. Пульпа диспергируется форсунками. Параллельно факелу распыла в головную часть барабана подают топочные газы. При нанесении пульпы на частицы завесы происходит образование гранул, которые затем досушиваются до требуемой влажности.

В настоящее время на многих производствах непосредственно перед БГС установлены трубчатые реакторы.

Установка в этой конструкции вместо форсунки пульпы ТР позволяет осуществить принципиально новый процесс аммонизации кислоты и гранулирования продукта без дополнительного подвода тепла (или существенно его снизив).

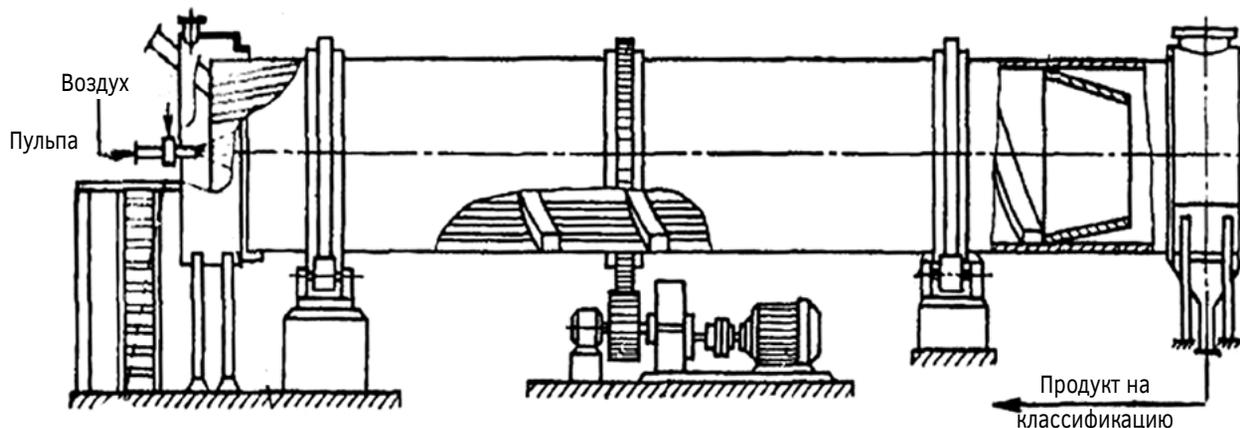


Рис. 13.12. Барабанный гранулятор-смеситель

Аммонизатор-гранулятор (АГ) — сушильный барабан (СБ)

Два барабанных аппарата, установленные последовательно и имеющие свое назначение: АГ предназначен для получения гранул методом окатывания, СБ — для их сушки.

АГ позволяет совместить в одном аппарате процессы смешения, нейтрализации и гранулирования, что дает возможность уменьшить материало- и энергоемкость процесса, упростить технологическую схему, так как за счет тепла, выделяющегося при взаимодействии аммиака с кислотами в АГ, происходит подсушивание материала.

Процесс аммонизации при одновременном гранулировании наиболее эффективен, поскольку тепло реакции выделяется равномерно по всему объему материала в момент

воздействия динамических нагрузок, что исключает локальные перегревы и потери тепла. При гранулировании орошение жидкостью ведут по поверхности гранул при достаточной влажности, поэтому реакция ее аммонизации проходит практически мгновенно.

Такая организация процесса позволяет ввести в удобрение значительное количество азота и других питательных компонентов (хлористого калия, сульфата аммония и др.).

Использование аппаратов АГ возможно только при применении концентрированных кислот, в противном случае резко возрастает ретурность процесса и, соответственно, расход энергоресурсов.

Технология позволяет получать широкий ассортимент удобрений с использованием только концентрированной кислоты.

Грануляционная башня

Грануляционная башня представляет собой железобетонный корпус диаметром 10–20 м и высотой до 120 м, в котором наверху размещено оборудование, необходимое для приема плава NP пульпы и хлорида калия (или других добавок), их смешения и разбрызгивания, а также аппаратура для улавливания пыли и вредных примесей из отходящих газов, а внизу — окна для забора воздуха и устройство для выгрузки гранул. Воздух протягивается вентиляторами, установленными в аппаратурной части, через нижние заборные окна.

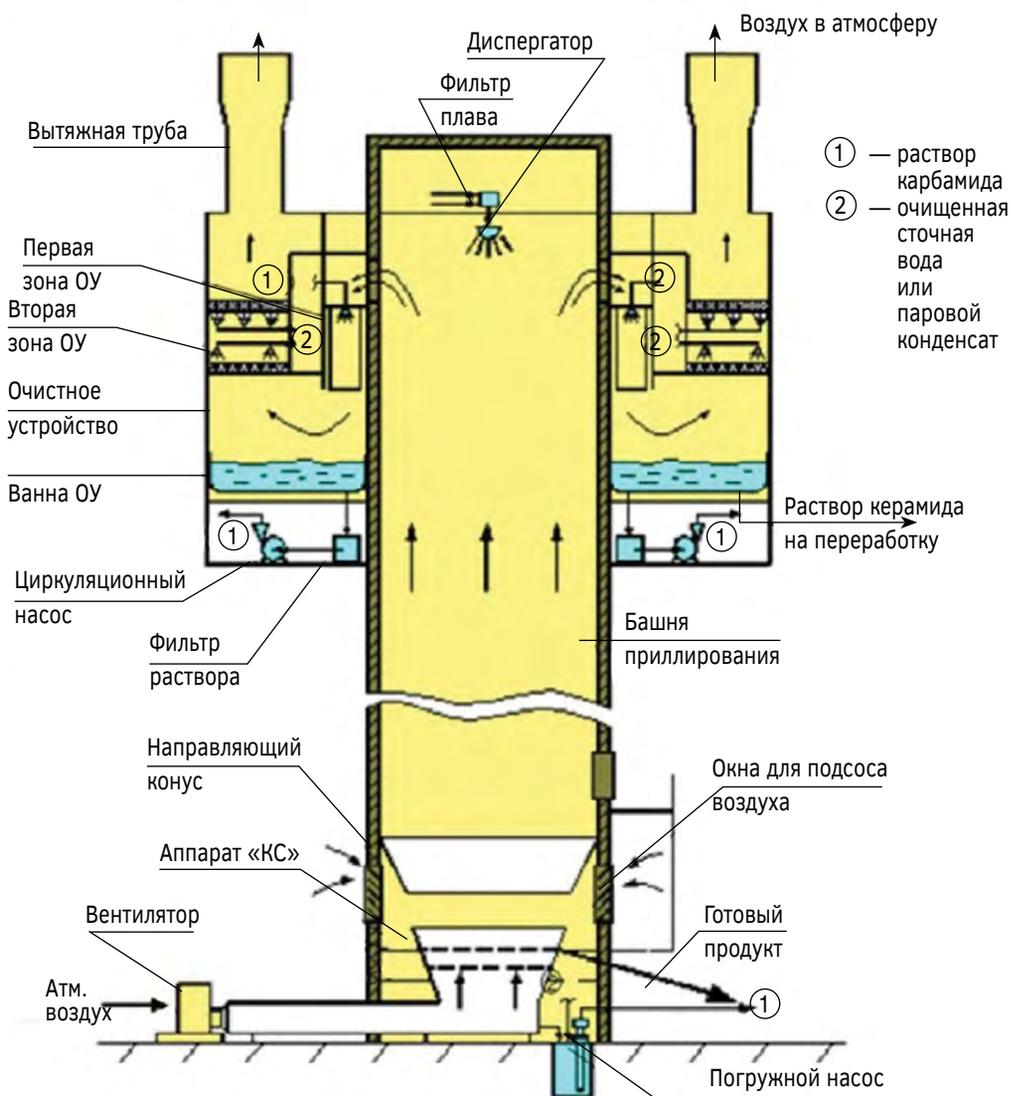


Рис. 13.13. Грануляционная башня

Затвердевшие гранулы падают на поворотное днище и выводятся через выгрузочное окно.

Необходимость работы с плавами требует поддержания их температуры при транспортировке и смешении с другими компонентами, в связи с чем необходим дополнительный расход энергоресурсов — пара.

Технология отработана при получении N, NP, NPK-удобрений и известково-аммиачной селитры. Ограничением является необходимость использования расплавов с четко определенной температурой плавления и относительно низкой вязкостью.

Оборудование для охлаждения и кондиционирования продукта

Охлаждение минеральных удобрений проводят не только для формирования гранул, но и для сохранения их физических свойств. Для снижения температуры сыпучих материалов до 40–50°С применяются различные методы, в том числе конвективный, кондуктивный и смешанный теплообмен. Применение того или иного способа охлаждения зависит от свойств продукта и размера частиц.

Конвективные аппараты

Конструктивное оформление таких холодильников может быть различным. В промышленности фосфорсодержащих удобрений наиболее часто применяют вращающиеся барабаны, что объясняется модернизацией старых схем производства с высвобождением таких аппаратов и приспособлением их для охлаждения продукта.

Более глубокое охлаждение достигается в противоточных барабанных холодильниках, снабженных в хвостовой части секторной насадкой, обеспечивающей большую поверхность контакта в зоне наиболее низких температур продукта.

Холодильники с кипящим слоем (КС) также широко используются в технологии минеральных удобрений. Конструктивно они различаются количеством и расположением секций, формой корпуса: цилиндрическая, коническая, цилиндроконическая; с круглым, квадратным или прямоугольным сечением.

Преимущества конвективных холодильников в высоком коэффициенте теплопередачи и возможности одновременного обеспыливания. Однако для промышленных площадок с жарким и влажным климатом атмосферный воздух перед подачей в аппарат необходимо охлаждать за счет тепла испарения аммиака, используемого в технологии, и осушать.

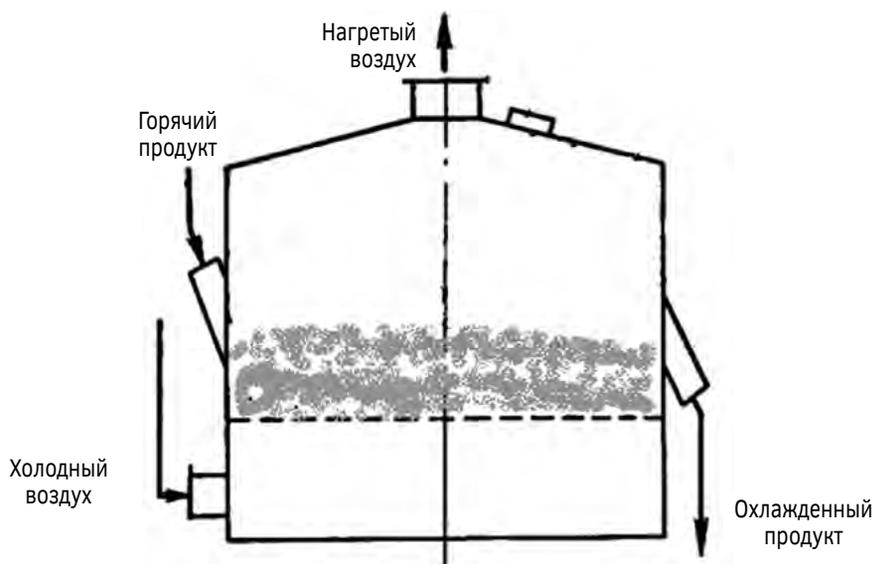


Рис. 13.14. Холодильник «кипящего слоя»

Обеспыливание на стадии охлаждения улучшает свойства продукта и предотвращает пыление при транспортировке, хранении и пересыпке.

Кондуктивные аппараты

Кондуктивные аппараты включают охлаждающие элементы из нержавеющей стали в виде вертикальных гофрированных пластин или горизонтальных труб ромбического сечения. Внутри этих элементов проходит охлаждающая жидкость, а между ними самотеком поступает охлаждаемый продукт. Элементы объединены в секции, скомпонованные по вертикали. Число секций и количество охлаждающих элементов в каждой из них зависят от производительности и свойств продукта. Высушенный материал, поступающий на охлаждение, несет с собой влажный воздух из сушилки и продолжает обезвоживаться. При понижении температуры испаренная влага насыщает воздух в порах между частицами слоя и может конденсироваться, что чревато налипанием продукта на теплообменную поверхность. Для устранения этого явления аппарат продувают осушенным воздухом и поддерживают перепад температур между теплоносителем и продуктом не более 10–15° С.

В процессе охлаждения не происходит удаление пыли, поэтому оно должно быть предусмотрено на других стадиях процесса.

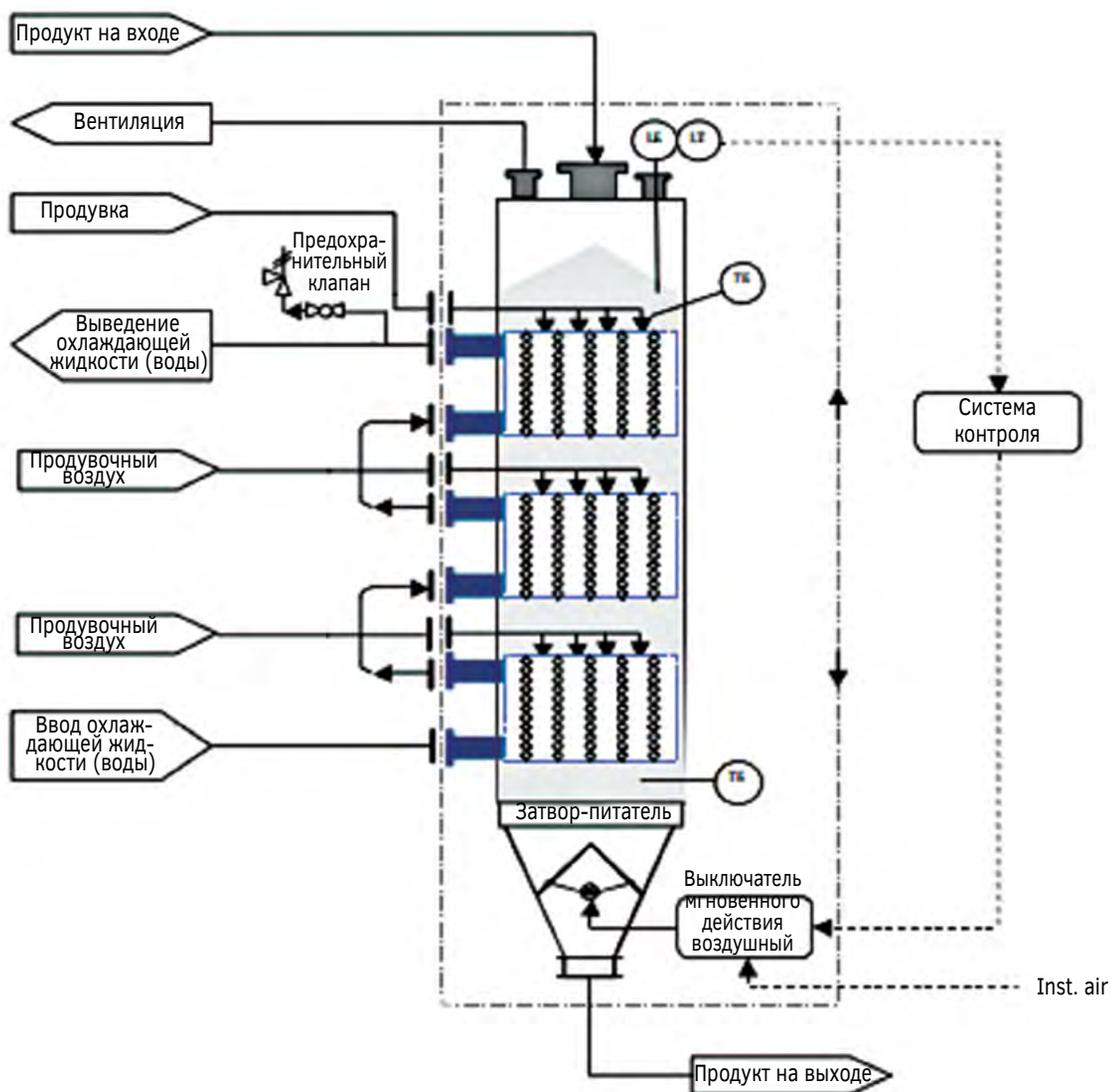


Рис. 13.15. Кондуктивный холодильник (расположение потоков)

Очистка отходящих газов

В производстве комплексных удобрений очистка отходящих газов может быть организована в одну или несколько стадий с использованием различных аппаратов (в зависимости от состава, характеристик и количества отходящих газов), таких как:

- циклоны (для запыленных, относительно сухих газов);
- полые абсорберы (для запыленных газов);
- абсорберы Вентури;
- абсорберы АПС (аппараты пенного слоя);
- брызгоуловители;
- рукавные фильтры (для сухих газов с небольшой запыленностью).

При наличии нескольких газовых потоков и сильном различии свойств очищаемых газов используют их отдельную очистку с индивидуальным набором газоочистного оборудования.

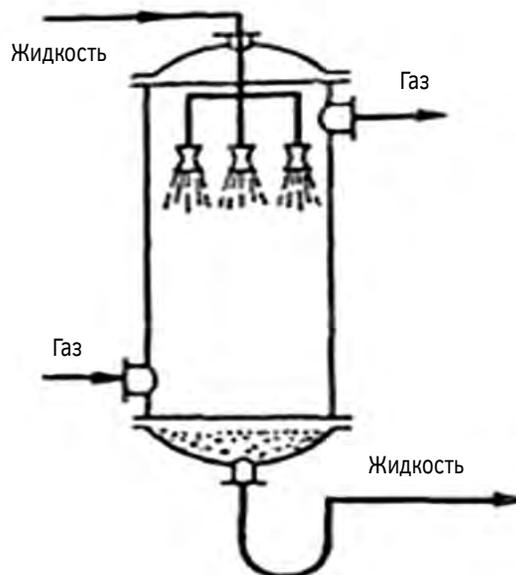


Рис. 13.16. Пोलый абсорбер

Аппарат использования тепла нейтрализации (ИТН) — вертикальный цилиндрический, работает под атмосферным давлением, состоит из двух частей: реакционной и сепарационной. Распределители аммиака и азотной кислоты выполнены в виде барботеров. Барботер азотной кислоты выполнен из титана для защиты от коррозии. Тепло реакции между азотной кислотой и аммиаком используется для выпаривания воды из раствора аммиачной селитры. Сепарационная часть снабжена четырьмя колпачковыми тарелками для промывки сокового пара и снятия тепла его перегрева.

Донейтрализатор предназначен для донейтрализации газообразным аммиаком избыточной кислотности раствора аммиачной селитры, непрерывно поступающего из аппарата ИТН. Раствор вводят в нижнюю часть аппарата, газообразный аммиак по центральной трубе сверху. Нейтрализация избыточной кислоты происходит в реакционной вставке.

Выпарные аппараты

Выпарной аппарат (в агрегатах АС-72, АС-72М, АС-67) предназначен для выпарки растворов аммиачной селитры под атмосферным давлением. В верхней части аппарата расположены две промывные ситчатые тарелки для промывки паровоздушной смеси, выходящей из аппарата. Средняя часть — вертикальный кожухотрубчатый теплообменник с падающей пленкой. В межтрубное пространство теплообменника подается греющий пар, раствор

равномерно распределяется на верхней трубной решетке и далее стекает по внутренней поверхности трубок в виде пленки, упариваясь до концентрации 99–99,5%. В противоток раствору подается горячий воздух, который играет роль водоотнимающего агента.

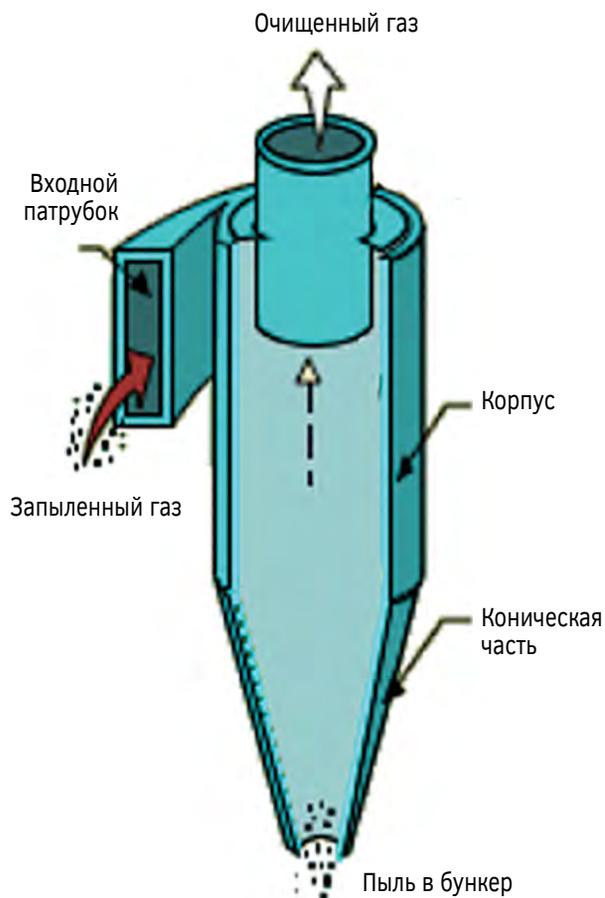


Рис. 13.17. Циклон

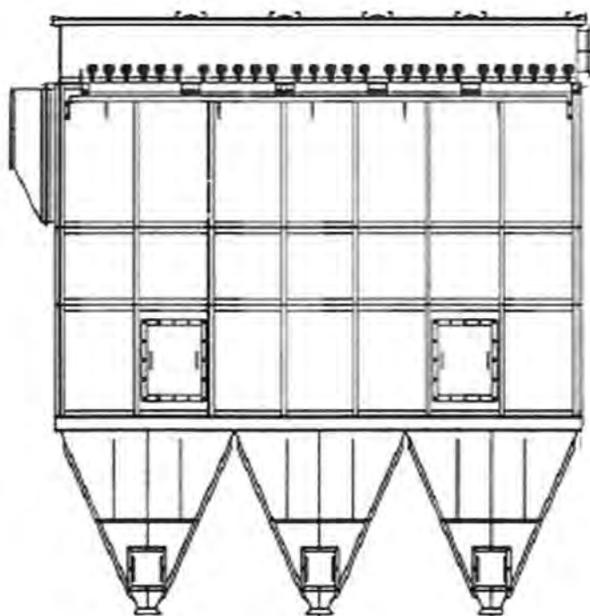


Рис. 13.18. Фильтр рукавный

Оборудование производства аммиачной селитры

Реакторы

В нижней части аппарата происходит доупаривание плава до массовой доли аммиачной селитры не менее 99,7% на пяти сетчатых тарелках провального типа, три верхние из которых снабжены обогревающими змеевиками.

В агрегатах АС-60 выпаривание раствора аммиачной селитры происходит в несколько стадий. Сначала 62–64%-ный раствор поступает в выпарной аппарат I ступени, который работает по принципу «вползания» пленки внутри вертикальных труб. Представляет собой кожухотрубчатый теплообменник с примыкающей к его верхней части сепаратором. Далее 82–84%-ный раствор подается в выпарные аппараты II ступени, которые по конструкции идентичны выпарным аппаратам I ступени. Образовавшийся 97,5–98%-ный плав направляется в доупарочные аппараты. Это вертикальные кожухотрубчатые теплообменники с двумя сетчатыми тарелками в нижней емкостной части. Унос паров влаги осуществляется горячим воздухом, продуваемым через трубки противотоком плаву.

Теплообменные аппараты

Подогреватель азотной кислоты — вертикальный кожухотрубчатый теплообменник, выполнен из титана.

Подогреватель газообразного аммиака — вертикальный кожухотрубчатый теплообменник.

Подогреватель воздуха — горизонтальный кожухотрубчатый теплообменник, для нагрева воздуха перед выпарным аппаратом.

Грануляторы

Грануляторы предназначены для равномерного разбрызгивания плава аммиачной селитры по заданной площади сечения грануляционной башни. Акустические грануляторы леечного типа статические. В виброгрануляторах виброколебания передаются в плав от пневматического вибратора через сжатый воздух. В вихревых виброгрануляторах вибратор электромагнитный.

Грануляционная башня

Грануляционная башня — строительное сооружение, предназначенное для осуществления процесса гранулирования высококонцентрированного плава аммиачной селитры.

Агрегаты АС-72, АС-72М: грануляционная башня прямоугольного сечения (11 × 8 м), выполнена из металла, обеспечивает высоту падения гранул 50 м.

Агрегаты АС-67: грануляционная башня круглого сечения диаметром 12 м, выполнена в железобетоне, обеспечивает высоту полета гранул 30 м.

Агрегаты АС-60: грануляционная башня круглого сечения диаметром 16 м, выполнена в железобетоне, обеспечивает высоту полета гранул 30 м.

Аппарат воздушного охлаждения

Полученный гранулированный продукт охлаждается в аппарате с кипящим (псевдоожиженным) слоем. В агрегате АС-67 кипящий слой размещен в нижней части грануляционной башни по всему ее сечению. В агрегате АС-72 аппарат кипящего слоя выносной, представляет собой прямоугольный аппарат 2,4 × 15 м. Состоит из трех последовательно расположенных секций с решетками, продукт может охлаждаться в одной, двух или в трех секциях, что позволяет регулировать режим охлаждения. Воздух подают под решетки каждой секции индивидуальным вентилятором.

Скрубберы

Скруббер-промыватель с фильтрующими элементами, установленный на башнях агрегатов АС-72 и АС-72М, выполнен в виде двух блоков прямоугольной формы, располагаемых вдоль длинных сторон прямоугольной башни. Скруббер предназначен для очистки воздуха от NH_3 и NH_4NO_3 перед сбросом в атмосферу. Воздух из башни поступает в блоки через прямоугольные проемы. Соковый пар из аппаратов ИТН и паровоздушная смесь из выпарного аппарата смешиваются с воздухом перед тарелками.

Каждый блок разделен на три смесительные секции. Установлены три ситчатые промывные тарелки и фильтрующие элементы. В верхней части каждого блока установлен сетчатый брызгоотбойник. Очищенная паровоздушная смесь вытягивается из каждой секции индивидуальным вентилятором. Аппарат работает под разрежением.

Промывной скруббер, установленный в агрегатах АС-67, представляет собой цилиндрический аппарат с центральным входом паровоздушной смеси. Аппарат имеет две непровальные тарелки и отбойное устройство — одна тарелка, аналогичная рабочим, и брызгоотбойник. Аппарат работает под напором. Предназначен также для очистки воздуха от NH_3 и NH_4NO_3 перед сбросом в атмосферу.

Аппараты колонные тарельчатые

Промыватель сокового пара, установленный в агрегатах АС-60, предназначен для улавливания аммиака и брызг аммиачной селитры из сокового пара после аппаратов ИТН. Внутри аппарата расположены три ситчатые тарелки с отбойными элементами и сетчатый отбойник.

Аппараты емкостные

Пенноструйный аппарат (агрегат АС-60М) используется для очистки паровоздушной смеси после доупарочного аппарата от аммиака и брызг концентрированного раствора и аэрозоля аммиачной селитры.

Производство известково-аммиачной селитры

В настоящее время известково-аммиачная селитра производится только на двух предприятиях Российской Федерации, причем по абсолютно разным технологиям; оборудование для получения ИАС в перечне оборудования скомпоновано по каждой технологии производства отдельно.

Производство ИАС гранулированием в БГС

Выпарная установка. Состоит из четырех выпарных аппаратов с выносной греющей камерой и принудительной циркуляцией. Предназначена для упаривания растворов.

Реактор. Аппарат с мешалкой специальной конструкции, используется для смешения компонентов.

Барабан-гранулятор-сушилка (БГС). Вращающийся барабан специальной конструкции, имеет обратный закрытый шнек и подъемно-лопастную насадку. Объединяет в одном аппарате гранулятор, сушилку и классификатор готового продукта.

Холодильник. Аппарат горизонтального типа с кипящим слоем для охлаждения гранул.

Оборудование газоочистное и пылеулавливающее. Циклоны и фильтровальная установка предназначены для очистки отходящих газов от мела с узла приема и хранения.

Скруббера и каплеуловители предназначены для очистки отходящих газов от аммиака и пыли удобрений.

Производство ИАС в барабане с кипящим слоем

Испарители. Испаритель I ступени — вертикальный теплообменник пленочного типа, предназначен для упаривания 85%-ного раствора аммиачной селитры до концентрации 95%. Обогревается паром среднего давления и продувается горячим воздухом по трубам с целью более полного удаления воды из плава.

Испаритель II ступени — вертикальный воздушный теплообменник, предназначен для доупарки 95%-ного плава аммиачной селитры до концентрации 99,7%. Верхняя камера испарителя имеет распределитель для более равномерного распределения раствора по трубкам. Обогревается паром среднего давления.

Гомогенизатор. Представляет собой вертикальный цилиндрический аппарат с мешалкой, предназначен для создания гомогенной смеси плава аммиачной селитры с доломитовой мукой. Обогревается паром среднего давления, подаваемым во внутренний змеевик аппарата.

Барабан-гранулятор. Представляет собой вращающийся барабан с подъемно-лопастной насадкой, предназначен для гранулирования плава ИАС с использованием ретура. В качестве ретура подается измельченный и просеянный продукт. Подача ретура осуществляется на кипящий слой, который создается горячим воздухом.

Оборудование газоочистное и пылеулавливающее. Скруббера предназначены для мокрой очистки пылегазовоздушной смеси перед выбросом в атмосферу.

Фильтры предназначены для очистки воздуха от доломита при загрузке бункеров приема и хранения доломита.

Оборудование производства карбамида

Оборудование производства карбамида представлено в виде групп, определяемых конструкцией аппаратов:

- реакторы;
- дистилляторы;
- абсорберы;
- грануляторы;
- прочее оборудование.

Группа реакторов отличается решениями по внутренним устройствам, устанавливаемым в реакторы синтеза карбамида — вихревой смеситель, насадка продольного секционирования, массообменные тарелки.

Эти внутренние устройства используются для создания в реакторе режима идеального вытеснения — гидродинамического режима, наиболее благоприятного для протекания процесса синтеза карбамида, и обеспечивают наиболее полное и эффективное использование объема реактора.

Дистилляторы представлены специальными конструкциями теплообменных устройств, отличаются режимами работы (среднее давление, низкое давление) и служат для разложения карбамата аммония и отгонки непрореагировавшего аммиака из плава.

Рекуператор газов дистилляции. Теплообменник-рекуператор совмещает в одном аппарате барботажный конденсатор-абсорбер и пленочный испаритель. Упариваемый раствор карбамида вводится в сепарационную камеру, где распределяется по теплообменным трубкам специальными устройствами и стекает тонкой пленкой по внутренней поверхности труб.

Распределительное устройство раствора карбамида в стриппере.

Стриппер является одним из основных аппаратов схемы со стриппинг-процессом и представляет собой вертикальный пленочный теплообменник.

Аппараты очистки отходящих газов представлены абсорберами среднего или атмосферного давления и установкой кислотного улавливания аммиака.

Башня приллирования. Приллирование — способ получения товарного карбамида, заключающийся в охлаждении сферических капель расплава, находящихся в свободном падении, и их последующей кристаллизации во встречном потоке охлаждающего воздуха.

Башня приллирования представляет собой сооружение из железобетона и металлоконструкций с внутренним диаметром до 16 м и высотой полета частиц до 80 м. Общая же высота башни составляет более 100 м.

Башня оснащена следующими узлами:

- диспергирования плава;
- охлаждения гранул во встроенном аппарате «кипящего» слоя (КС), располагающимся в нижней части башни;
- установкой пылеочистки, располагающимся в верхней части башни.

Также для гранулирования карбамида используют способ грануляции в кипящем слое Stamicarbon.

Преимуществом грануляции в кипящем слое можно назвать получение готового продукта с повышенной прочностью — до 3,5 кгс/гранулу и большим средним размером гранул 3 мм.

Оборудование производства хлористого калия

Основной особенностью флотационного способа является изменение смачиваемости водой поверхности разделяемых соляных минералов сильвина (KCl) и галита (NaCl) после обработки руды реагентом-собирателем, в результате чего происходит селективное закрепление частиц сильвина на пузырьках воздуха и извлечение хлористого калия в пенный продукт флотационной машины.

Галургический способ производства хлористого калия из калийных руд, или метод избирательного растворения хлористого калия и последующей его кристаллизации, основан на различии температурных коэффициентов растворимости хлоридов калия и натрия при их совместном присутствии в водном растворе. При нормальной температуре растворимость хлоридов калия и натрия почти одинакова. С повышением температуры растворимость хлорида натрия практически не меняется, а растворимость хлорида калия резко возрастает. Проведение выщелачивания хлористого калия из руды при температуре 100–105°С позволяет получать солевые растворы с увеличенным содержанием хлористого калия, из которых при последующем вакуумном охлаждении растворов селективно кристаллизуется хлористый калий.

Основным оборудованием производства хлористого калия являются:

- дробилки и грохота — дробление руды и рассев руды;
- сито дуговое, мельница стержневая, флотационная машина, сгуститель — оборудование обогащения флотационным способом;
- растворитель шнековый, сгуститель, установка вакуум-кристаллизации — оборудование обогащения галургическим способом;
- вакуум-фильтр, центрифуга, сгуститель, сушильные аппараты (барабанные сушилки, печи КС) — удаление влаги;
- печь КС, пресс, дробилка, грохот — компактирование;
- конвейер ленточный, кратцер-кран — складирование и отгрузка.

СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ

С учетом специфики отрасли (невозможность замены одного питательного элемента другим) сравнение технологий производства удобрений возможно только внутри одного вида минеральных удобрений.

При выборе параметров для сравнения необходимо руководствоваться, прежде всего, интегральными показателями ресурсо- и энергоэффективности. Так, ресурсоэффективность можно оценить с использованием коэффициента использования сырья (отношения массы введенных в процесс компонентов к массе полученного продукта) и расхода фосфатного сырья P_2O_5 фоссырья/т P_2O_5 продукта.

Энергоэффективность производства можно оценить по суммарному расходу энерго-ресурсов на 1 т продукта.

С учетом того, что существует широкий ассортимент минеральных удобрений с различным содержанием питательных элементов, целесообразно также учесть энергозатраты на хранение, транспортировку и внесение 1 т P_2O_5 минеральных удобрений.

На рис. 13.19 на примере фосфорных удобрений приведено сравнение технологий производства по данным параметрам.

Как видно из графика, у простого суперфосфата наибольший коэффициент использования сырья (все сырьевые компоненты переходят в продукт) и наименьший расход фосфатного сырья P_2O_5 сырья/т P_2O_5 продукта, однако это наиболее бедное фосфорное удобрение.

При осуществлении более глубокой переработки преципитат — двойной суперфосфат коэффициент использования сырья уменьшается, а расходный коэффициент увеличивается, при этом увеличивается содержание питательного компонента (до 48% P_2O_5 в двойном суперфосфате) и качество готового продукта. При увеличении содержания питательного компонента в продукте соответственно уменьшаются удельные затраты на хранение, транспортировку и внесение удобрений.

Таким образом, при оценке различных технологий целесообразно учитывать как показатели производства удобрений (ресурсные, энергетические), так и показатели качества готового продукта, характеризующие его применение и эффективность.

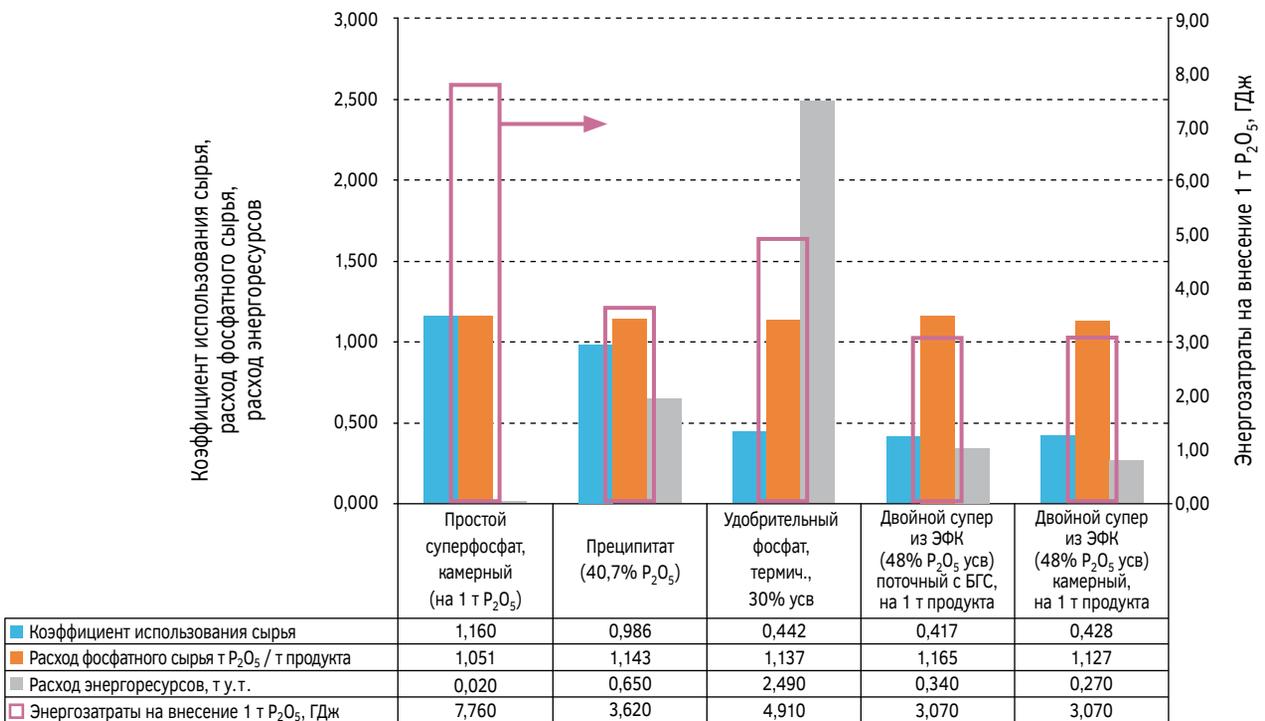


Рис. 13.19. Сравнение технологий производства фосфорных удобрений

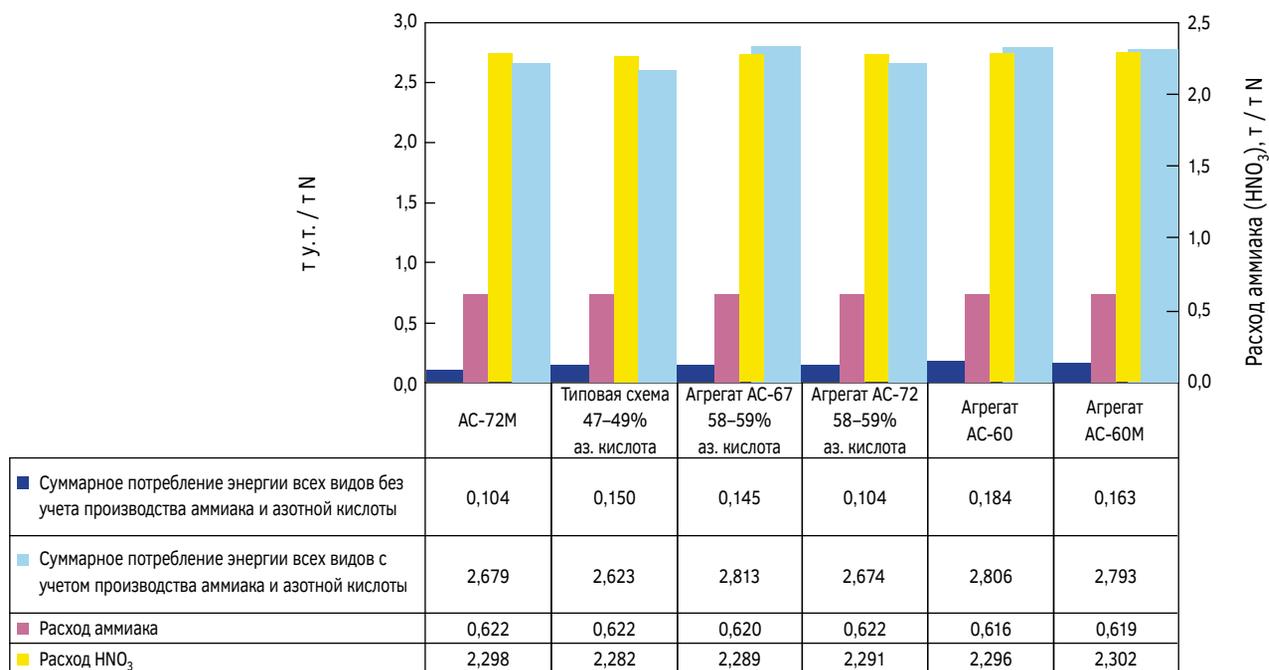


Рис. 13.20. Сравнение технологий производства аммиачной селитры по ресурсо- и энергопотреблению²⁹

Применительно к производству азотных удобрений различия показателей ресурсо- и энергоэффективности в зависимости от применяемых технологий будут выглядеть следующим образом:

Наименьшие расходы аммиака и азотной кислоты характерны для агрегата AC-60 и агрегата по типовой схеме на разбавленной азотной кислоте и равны 0,616 т NH₃/т N и 2,282 т HNO₃/т N соответственно. Суммарное потребление всех видов энергии собственно в производстве азотной кислоты минимально для агрегатов AC-72 и AC-72M и составляет 0,104 т у. т./т N. С учетом затрат энергии на производство аммиака и азотной кислоты в соответствующих производствах наименьшее суммарное потребление всех видов энергии характерно в настоящее время для агрегата AC-72 и составляет 2,696 т у. т./т N.

Средние показатели энергопотребления и расходов аммиака и азотной кислоты для эксплуатируемых в России в настоящее время агрегатов по производству аммиачной селитры соответственно равны: 2,731 т у. т./т N, 0,620 т NH₃/т N и 2,295 т HNO₃/т N.

Наиболее существенным является расход водяного пара. Расчетный расход водяного пара в крупнотоннажных агрегатах невелик и складывается из расхода на нагрев воздуха перед выпарным аппаратом, выпарку раствора до 99,7–99,8%-ного плава и на обогрев трубопроводов.

Производство карбамида

Технологии карбамида, применяемые в настоящее время:

- классический полный жидкостный рецикл Stamicarbon с полной или частичной реконструкцией URECON®2006;
- процесс Stamicarbon с незамкнутым циклом без усовершенствования;

²⁹ В расчетах для агрегатов AC-60, AC-60M, AC-72, AC-72M учтены расходы на производство азотной кислоты в системах, работающих под давлением; в расчетах для типового агрегата — системах под атмосферным давлением. Пересчет на 1 N выполнен для аммиачной селитры марки Б с содержанием азота 34,4%.

- усовершенствованный процесс с полным жидкостным рециклом фирмы TEC;
- процесс Stamicarbon со стриппингом в токе диоксида углерода;
- процесс с автостриппинг в токе аммиака;
- процесс с полным жидкостным рециклом фирмы Tecnimont.

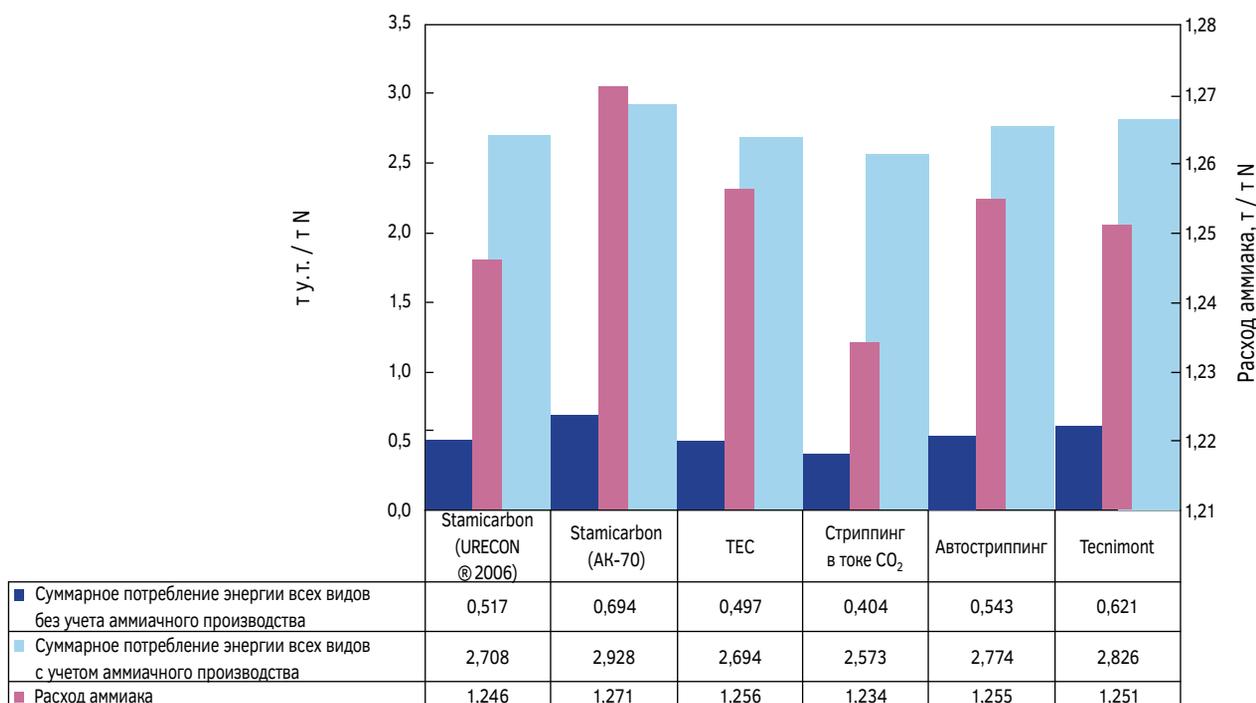


Рис. 13.21. Сравнение агрегатов производства карбамида по ресурсо- и энергопотреблению³⁰

Из современных действующих агрегатов по синтезу карбамида в России наименьшими показателями энергопотребления и расхода аммиака обладают агрегаты, построенные по технологии голландской фирмы Stamicarbon, работающие со стриппинг-процессом в токе диоксида углерода: 1,234 т NH₃/т N и 2,598 т у. т./т N соответственно.

Средние показатели энергопотребления и расхода аммиака для эксплуатируемых в России в настоящее время агрегатов синтеза карбамида равны соответственно: 2,772 т у. т./т N и 1,252 т NH₃/т N.

Технологии связанного азота в целом

Из рис. 13.22 видно, что затраты энергии всех видов на производство аммиачной селитры и карбамида примерно одинаковые, поэтому выбор в пользу того или иного продукта определяется его качеством и спросом на него.

Для сравнения технологий производства различных продуктов может быть использован E-фактор (отношение массы побочных продуктов, отходов, потерь и т. д. к массе целевого продукта) и атомная эффективность (отношение молярной массы целевого продукта к сумме молярных масс остальных продуктов в стехиометрическом уравнении). Пример использования атомной эффективности для сравнения различных производств азотсодержащих продуктов приведен в табл. 13.3.

³⁰ Пересчет на 1 т N выполнен для карбамида марки А с содержанием 46,3% N.



Рис. 13.22. Сравнение производств связанного азота по энергопотреблению

Таблица 13.3. Сравнение производств связанного азота по атомной эффективности

Технология связанного азота	Суммарная реакция	Атомная эффективность
Аммиачная селитра	$\text{NH}_3 + \text{HNO}_3 = \text{NH}_4\text{NO}_3$	Макс
Азотная кислота (дуговой метод)	$3\text{N}_2 + 6\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = 4\text{HNO}_3 + 2\text{NO}$	4,17
Азотная кислота (окисление аммиака)	$\text{NH}_3 + 2\text{O}_2 = \text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	3,45
Карбамид	$\text{CO}_2 + 2\text{NH}_3 = \text{CO}(\text{NH}_2)_2 + \text{H}_2\text{O}$	3,33
Карбамид (с учетом производства аммиака)	$3\text{CH}_4 + 6\text{H}_2\text{O} + 4\text{N}_2 + \text{CO}_2 = 4\text{CO}(\text{NH}_2)_2 + 4\text{H}_2\text{O}$	3,33
Цианамид	$\text{CaO} + 3\text{C} + \text{N}_2 = \text{CaCN}_2 + \text{CO} + \text{C}$	2,00
Азотная кислота (окисление аммиака, с учетом производства аммиака)	$3\text{CH}_4 + 6\text{H}_2\text{O} + 4\text{N}_2 + 16\text{O}_2 = 3\text{CO}_2 + 8\text{HNO}_3 + 8\text{H}_2\text{O}$	1,82
Аммиачная селитра (с учетом производств аммиака и азотной кислоты)	$3\text{CH}_4 + 6\text{H}_2\text{O} + 4\text{N}_2 + 8\text{O}_2 = 3\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O} + 4\text{NH}_4\text{NO}_3$	1,56
Аммиак (конверсия метана)	$3\text{CH}_4 + 6\text{H}_2\text{O} + 4\text{N}_2 = 3\text{CO}_2 + 8\text{NH}_3$	1,03
Аммиак (электролиз воды)	$6\text{H}_2\text{O} + 2\text{N}_2 = 4\text{NH}_3 + 3\text{O}_2$	0,71
Аммиак (газификация твердого топлива)	$6\text{C} + 3\text{O}_2 + 6\text{H}_2\text{O} + 2\text{N}_2 = 6\text{CO}_2 + 4\text{NH}_3$	0,26

Из данных табл. 13.3 следует, что наибольшей атомной эффективностью обладает производство аммиачной селитры, но с учетом того, что для получения аммиачной селитры необходимы аммиак и азотная кислота, атомная эффективность будет равна 1,56. Наименьшая атомная эффективность характерна для производства аммиака из водорода, получаемого газификацией твердого топлива, наибольшая для карбамида — 3,33.

Таким образом, приведенные критерии можно использовать как для сравнения технологий одного вида удобрений, так и технологий производства разных видов удобрений между собой.

РОЛЬ ОТРАСЛИ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ В ГЛОБАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКЕ

Наибольший вклад в оборот химической промышленности вносит производство минеральных удобрений. На долю удобрений в экспорте отечественной продукции химического комплекса приходится около 35%.

Наличие уникальной сырьевой базы позволяет выпускать весь спектр минеральных удобрений, российские производители входят в число наиболее крупных по всем сегментам: азотному, фосфорному и калийному.

В производстве калийных и фосфорсодержащих удобрений преимущество отечественных производителей обусловлено доступом к отечественному сырью (калийные и фосфатные руды). Модернизация существующих предприятий в сегменте азотных удобрений с целью повышения энергоэффективности, ресурсосбережения и экологической безопасности позволяет сохранить конкурентоспособность на глобальном рынке. Модернизация мощностей также ведет к снижению негативного воздействия производств минеральных удобрений на окружающую среду при ужесточении и общей гармонизации экологических требований с международными экологическими стандартами.

Важным фактором конкурентоспособности российских производителей является расширение производства сложных и комплексных удобрений, адаптированных под современные потребительские предпочтения. Рост данных продуктовых направлений потребует от компаний собственных научно-исследовательских разработок и технологий в области производства и применения минеральных удобрений.

Сохранение позиций на экспортных рынках должно сопровождаться развитием внутреннего рынка посредством стимулирования потребления минеральных удобрений и увеличения доли использования сложных удобрений в сельском хозяйстве. Особенность российского рынка минеральных удобрений — невысокий уровень спроса, покрывающий на сегодняшний день около 30% выпуска. В последнее десятилетие наблюдалась положительная динамика: объем российского рынка увеличивался, достигнув своего максимального значения — 8,2 млн т (в пересчете на 100% питательных веществ) — в 2011 г.

Для реализации потенциала внутреннего рынка должна оказываться более активная государственная поддержка сельхозтоваропроизводителей в виде доступа к дешевым источникам финансирования и (или) предоставления дотаций на развитие инфраструктуры по транспортировке, хранению и внесению минеральных удобрений, в том числе сложных, и последующей интенсификацией сельского хозяйства (по данным ИТС по НДТ 2–2015).

На сегодняшний день отличительной чертой мирового рынка минеральных удобрений является транснациональность (большинство корпораций располагают активами в более чем одной стране), а также диверсифицированность бизнеса (наличие различных видов удобрений в продуктовой линейке производителей).

Продолжается тенденция к ужесточению конкуренции на мировых рынках в связи с запуском новых мощностей в странах Персидского залива и Северной Африки, цены на газ в которых в 2–3 раза ниже, чем в России, а сами предприятия расположены вблизи экспортных портов, что минимизирует логистические затраты.

По данным плана мероприятий («дорожная карта») по развитию производства минеральных удобрений на период до 2025 г. (распоряжение Правительства РФ от 29.03.2018 г. № 532-р), основными факторами развития внешнего рынка являются:

- усиление конкуренции во всех сегментах рынка, связанной с опережающим вводом новых мощностей в основных странах — производителях минеральных удобрений;
- вытеснение участников с высокой себестоимостью производства;
- формирование (за счет наращивания объемов производства в странах с доступом к дешевому сырью, инфраструктуре, финансированию) новых центров производства следующих видов минеральных удобрений: азотные — Российская Федерация, Ближний Восток, Соединенные Штаты Америки, Тринидад и Тобаго и Европейский союз; фосфорные и сложные — Российская Федерация, Марокко, Китай и Соединенные Штаты Америки; калийные — Российская Федерация, Канада, Белоруссия и Туркменистан.

Основным конкурентным преимуществом для развития отечественных производителей минеральных удобрений и усиления их позиции на внешнем рынке является доступ к дешевому сырью и низкая себестоимость производства минеральных удобрений.

Экспортный потенциал является основным определяющим фактором развития отрасли минеральных удобрений.

Одним из основных направлений получения добавленной стоимости и коммерциализации основных видов сырья является получение широкой гаммы химической продукции, в том числе аммиака и минеральных удобрений, а также возможность организации смежных производств — метанола и меламина на азотных предприятиях, очищенных кислот и фосфатов на предприятиях фосфорсодержащих удобрений и т. д.

Таблица 13.4. Производство минеральных удобрений в России и мире в 2018–2019 гг., млн т

	2018 г.		2019 г.	
	в мире	в России	в мире	в России
Азотные	169,3	10,4	171,3	10,9
Фосфорные	52,8	4,0	54,1	4,3
Калийные	47,4	8,4	49,8	9,2
ИТОГО	269,5	22,8	275,2	24,4

ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ

В долгосрочной перспективе цена и спрос на удобрения будут только расти — вне зависимости от экономических факторов. Это обусловлено тем, что объем потребляемых удобрений напрямую связан с развитием сельского хозяйства и увеличением населения планеты. Сейчас на Земле живет почти 7,6 млрд человек, к 2050 г., по прогнозам ООН, население Земли составит более 9 млрд человек. Соответственно потребности в продовольствии также будут возрастать. В перспективе ожидается рост производства биотоплива, при производстве которого также будут необходимы удобрения.

По подсчетам специалистов, рост урожайности сельхозкультур на 50% зависит от применения удобрений, а вторая половина приходится на другие факторы (сорта, агротехнику, мелиорацию и т. д.). Поэтому ни один современный высокоурожайный сорт не раскроет свой потенциал без перехода к интенсивным и высоким агротехнологиям, что, в свою очередь, невозможно без увеличения количества применяемых удобрений.

Сравнение объемов применения минеральных удобрений и урожайности сельхозкультур на пике химизации сельского хозяйства СССР и в других странах представлено в табл. 13.5.

Таблица 13.5. Применение минеральных удобрений и урожайность зерновых (в среднем за 1986–1988 гг.; Ягодин, 2016)

Страна	Обеспеченность пашни минеральными удобрениями, кг/га	Средняя урожайность, т/га
СССР	99	1,59
США	103	4,35
Великобритания	359	5,67
ФРГ	427	5,39
Нидерланды	771	6,93

В международном рейтинге по урожайности зерновых культур в 2011–2013 гг. Россия занимала 106–110-е место (Total-Rating.ru). Средняя урожайность в нашей стране за счет вывода из оборота худших земель и начавшегося роста применения удобрений лишь в последние годы достигла 2,6 т/га, при средней мировой — 3 т, а в отдельных европейских странах — 8–9 т/га, с мировыми рекордами до 16 т зерна с гектара.

Экстенсивные технологии, малое количество применяемых в России удобрений грозит не только низкими урожаями (несмотря на ежегодные рекордные, за счет больших площадей, валовые сборы зерна), но и истощением почвенных ресурсов. По сравнению с советским периодом объемы применяемых минеральных удобрений снизились в 5 раз, органических — в 8, химических мелиорантов — более чем в 20 раз!

По данным агрохимической службы, по состоянию на 2017 г. почвы с низким содержанием гумуса занимают более 60% обследованных площадей, почвы с повышенной кислотностью ($pH_{KCl} \leq 5,5$) — 35%. Доля почв с низким и очень низким содержанием подвижного фосфора составляет 25%, со средним 36%, со средним и низким содержанием обменного калия 30%.

Таблица 13.6. Агрохимическая характеристика почвы сельскохозяйственных угодий

Гумус	Меньше минимального содерж.	Слабогумусированные	Среднегумусированные	Сильногумусированные	–	–
	27	34	26	13	–	–
pH_{KCl} *	Очень сильнокислые	Сильнокислые	Среднекислые	Слабокислые	Близкие к нейтральным	Нейтральные
	<1	3	10	21	19	31
Фосфор	Очень низкое	Низкое	Среднее	Повышенное	Высокое	Очень высокое
	7	18	36	20	12	7
Калий	Очень низкое	Низкое	Среднее	Повышенное	Высокое	Очень высокое
	2	9	19	27	24	19

* На долю слабощелочных и щелочных почв приходится ~ 14%.

Сегодня окупаемость 1 кг удобрений зерном в России более чем в два раза ниже по сравнению со среднемировой (10 кг/кг). Основными причинами низкой окупаемости применения удобрений в Российской Федерации являются неблагоприятные социально-экономические условия, низкий уровень культуры земледелия, профессиональной подготовки и научного обеспечения. Также важным фактором, влияющим на окупаемость удобрений, является окультуривание почвы. Исследования, проводимые во ВНИИ агрохимии имени Д. Н. Прянишникова под руководством С. А. Шафрана, наглядно показывают, что с ростом содержания в почве подвижного фосфора и обменного калия до повышенного и высокого уровня приводит к росту окупаемости азотных удобрений прибавкой урожая более 10 кг/кг. Однако в течение последних 20–25 лет в практике сельского хозяйства Российской Федерации из удобрений основное место занимает аммиачная селитра 65–71%, а в ряде регионов на ее долю приходится более 80%, в то время как сложные удобрения занимают лишь 23%, фосфорные — 20%, калийные — 4%. Таким образом, наблюдаемое в настоящее время господство азотных удобрений в отечественном сельском хозяйстве, в свою очередь, и может приводить к снижению их эффективности, нарушению формирования урожая и его качества.

Результаты исследований показывают, что применение азотных удобрений на почве с низким содержанием подвижного фосфора малоэффективно и, напротив, получение более высоких урожаев лучшего качества на почвах с содержанием P_2O_5 выше среднего возможно при меньших затратах азотных удобрений

Таким образом, переход к интенсивным и высоким агротехнологиям с повышением урожайности сельхозкультур и окупаемости удобрений невозможно без комплексного подхода к химизации сельского хозяйства и целенаправленного окультуривания почвы. Особое место в окультуривании земель занимает распространенное в советское время фосфоритование, а также известкование кислых почв, способное увеличить эффективность минеральных удобрений на 30–40%.

Обработка результатов длительных полевых опытов с удобрениями, проведенных в разных зонах страны, и расчет баланса элементов питания по регионам показали, что для неполной компенсации выноса элементов питания урожаем поставки минеральных удобрений на внутренний рынок нашей страны должны составлять примерно более 7 млн т питательных веществ.

Таблица 13.7. Потребность земледелия России в минеральных удобрениях

Уровень потребности	Питательное вещество, млн т д. в.			
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Всего
Минимальный	3,2	2,7	1,2	7,1
Поддерживающий	4,9	4,7	2,5	11,8
Перспективный	6,5	6,0	3,5	16,0
Оптимальный	10,2	9,1	6,7	26,0

По расчетам ВНИИ агрохимии имени Д. Н. Прянишникова, применение минеральных удобрений в количестве 8–12 млн т д. в. позволит обеспечить сохранение плодородия почвы, а незначительный дефицит баланса по фосфору и калию будет покрываться за счет естественных внутрпочвенных процессов в пахотном слое и использования растениями элементов питания из подпахотных горизонтов почвы, роль которых в питании растений в настоящее время недооценена.

Рост отечественного сельского хозяйства невозможен без перехода к нормальным и интенсивным технологиям сельхозпроизводства и мобилизации использования имеющихся ресурсов минеральных удобрений.

По оценкам академика В. И. Кирюшина (2016), освоение нормальных и частично интенсивных агротехнологий потребует применения около 4,5 млн т д. в. удобрений и увеличения обеспеченности пашни минеральными удобрениями вдвое, с 49 до 100 кг д. в./га, что обеспечит рост валового сбора зерна при существующей посевной площади (около 45 млн га).

Последующее распространение интенсивных агротехнологий на лучшие земли и нормальных агротехнологий на остальных, позволит довести посевные площади зерновых культур до 70 млн га. Это потребует увеличения обеспеченности пашни до 150 кг д. в./га (применение 10,5 млн т д. в. в год) и при условии комплексной химизации сможет обеспечить рост урожайности зерновых до 3 т/га и валового сбора зерна до 200 млн т. При этом окупаемость удобрений благодаря повышению наукоемкости и точности агротехнологий возрастет до 9–10 кг зерна за 1 кг д. в. удобрений.

В дальнейшем, если это будет необходимо, интенсификация сельскохозяйственного производства путем сочетания интенсивных, высоких и нормальных агротехнологий при увеличении внесения удобрений до 200 кг/га (применение 14 млн т д. в. в год) позволит обеспечить рост урожайности зерновых до 3,9 т/га и валового сбора до 270 млн т зерна при окупаемости удобрений 12 кг зерна за 1 кг д. в. При этом годовая потребность отечественного земледелия в минеральных удобрениях останется значительно ниже их производства.

В подобных моделях применения удобрений наиболее значимыми из азотных удобрений являются аммиачная селитра и мочевины, на долю которых в сумме должно приходиться до 50% общей потребности; среди других форм важное место отводится жидким азотным удобрениям — карбамидно-аммиачным смесям и сложным твердым удобрениям (по 20%). Большая часть фосфора (до 50%) должна вноситься в почву в составе комплексных удобрений

(аммофос, диаммофос и их производные). Четверть от общего количества внесенного фосфора должна приходиться на долю фосфоритной муки.

Важным моментом является обеспечение растений мезоэлементами — магнием и серой. Если проблема магния относительно легко решается при проведении известкования, то после прекращения производства и применения простого суперфосфата проблема недостатка серы в отдельных случаях стоит достаточно остро, что делает необходимым производство и применение NPS- и PKS-удобрений.

Достаточное обеспечение пашни макроэлементами приведет к росту потребности в микроэлементах, необходимость которых в настоящее время при низкой урожайности невысока. По результатам материалов крупномасштабного агрохимического обследования почв, низкая и средняя обеспеченность выявлена для бора на 26,8% обследованных площадей почв, по молибдену — на 84,5% площадей (что, очевидно, связано с высокой кислотностью почв), по цинку — на 96,9%, по меди — на 71,6%, по марганцу — на 74,5%, потребность в применении кобальта выявлена на 87,9% обследованных площадей почв. Однако следует понимать, что применение микроудобрений без достаточного обеспечения азотом, фосфором и калием является бесполезной тратой средств.

Дополнительным ресурсом производства удобрений могут стать отходы животноводства, с которыми можно дополнительно внести около 2,5 млн т д. в., а также использование местного, в том числе низкопроцентного, сырья. Не менее важным является организация производства микробиологических препаратов, действие которых способно оптимизировать баланс азота и фосфора в почве на 20–30 и 10–15% соответственно. Особенно важны эти препараты для инокуляции семян бобовых и зернобобовых культур, с целью интенсификации азотфиксации.

Несовершенство химических, физических и механических свойств удобрений может явиться причиной снижения их эффективности и негативного воздействия на окружающую среду. Важную роль в повышении эффективности минеральных удобрений играют и их физические свойства: влажность, гигроскопичность, слеживаемость, прочность гранул и т. д. Для производства сухих тукосмесей или тукосмешения непосредственно в хозяйстве важно соблюдать однородность гранулометрического состава минеральных удобрений, поскольку различный размер гранул удобрений приводит неравномерному их рассеву центробежными разбрасывателями вследствие их сегрегации и сепарации. Неравномерное внесение может существенно снижать эффективность применяемых удобрений: азотных — на 45–50%, фосфорных — на 15–20%, калийных и сложных — на 35–40%.

Большое значение имеет прочность гранул. Так, гранулы малой прочности больше подвержены разрушению под давлением массы верхних слоев удобрений, истиранию друг о друга при погрузочно-разгрузочных работах, что, в свою очередь, приводит к существенным потерям и неравномерному внесению.

К несовершенству химических свойств минеральных удобрений относится наличие в них так называемых балластных элементов, которые могут накапливаться в почве при систематическом применении и отрицательно влиять на плодородие, величину и качество урожая, мигрировать в грунтовые воды. Поэтому важнейшей характеристикой удобрений является концентрация в них элементов питания, от которой зависит и нагрузка на окружающую среду за счет снижения поступления фтора, кадмия, стронция, хлора, натрия и т. д., и расходы на хранение, внесение и транспортировку концентрированных удобрений, которые значительно ниже, чем удобрений с низким содержанием действующего вещества, что, учитывая большие расстояния в России или при поставке за рубеж, имеет особо важное значение. В среднем при внесении калийных удобрений в дозе 50–60 кг/га в почву поступает 30–35 кг/га хлора. Фосфатное сырье содержит в себе заметные количества фтора, стронция, редкоземельных и радиоактивных элементов. На 1 т P_2O_5 фосфатных руд может приходиться до 80–100 кг фтора, 30–40 кг стронция, 20–25 кг окислов редкоземельных элементов, до 14 г урана и $7 \cdot 10^{-6}$ юри радия. Если с азотными удобрениями в почву может поступать до 10 г/га мышьяка, то с суперфосфатом уже от 30 до 300 г/га. В связи с этим особое внимание должно уделяться совершенствованию технологий переработки и производству высококонцентрированных удобрений.

Увеличение концентрации действующего вещества в удобрении приводит не только к росту экономической эффективности применения удобрений, но и позволяет снизить нагрузку на почву, что становится еще более актуальным в условиях защищенного грунта. В настоящее время площадь теплиц в мире составляет почти 500 тыс. га со средним годовым приростом площадей более 10%.

В России также наблюдается постепенное увеличение площади защищенного грунта. За период с 1913 по 1939 г. площадь теплиц в России выросла с 4 до 83 га. К 1969 г. она достигла 713 га, а к концу советского периода — уже 4,7 тыс. га. В 90-х гг. наблюдалось значительное сокращение площадей. В 2006 г. теплицы занимали уже 1,9 тыс. га, в 2014 г. — 2 тыс. га, к 2016 г. площадь зимних теплиц достигла 2,2 тыс. га. В настоящее время — около 3,3 тыс. га, с дальнейшим увеличением площади защищенного грунта, необходимым для обеспечения населения страны свежей овощной продукцией.

В условиях защищенного грунта идет планомерный переход от грунтового выращивания овощей к различным видам гидропоники (малообъемная гидропоника, глубоководная культура, техника питательного слоя, аэропоника и др.), что делает необходимым более тщательный подход к выбору минеральных удобрений. Основными требованиями к применяемым удобрениям становится их полная растворимость и безбалластность (монофосфат калия, калийная и аммиачная селитра, аммофос и т. д.), что позволяет обеспечивать растения необходимым количеством элементов питания при меньшем повышении концентрации питательного раствора, электропроводность которого не должна, как правило, превышать 2–2,5 мСм/см.

Ассортимент минеральных удобрений, применяемых в защищенном грунте, должен предусматривать наличие всех макро- и микроэлементов, в том числе магния, серы, а для зеленых культур также хлора и натрия в небольших количествах в легкодоступной водорастворимой форме. Обязательным компонентом для приготовления питательных растворов является кальциевая селитра. Эти удобрения могут выпускаться как самостоятельно, так и в виде готовых концентратов, дифференцированных по видам растений и фазам их развития.

Если применение водорастворимых форм минеральных удобрений в защищенном грунте является необходимым, то в поле эффективность азотных удобрений снижается в основном за счет нитрификации аммонийных форм и мочевины и дальнейшего вымывания легкоподвижного нитратного азота при промывном водном режиме. На почвах легкого гранулометрического состава также могут наблюдаться существенные потери калия. Вымывание элементов питания не только снижает окупаемость удобрений, но и может приводить к загрязнению грунтовых вод нитратами и эвтрофикации водоемов.

Значительные газообразные потери (15–25%) происходят в процессе денитрификации нитратов (N_xO_y) и аммонификации мочевины (NH_3). Для снижения потерь элементов питания за счет вымывания и денитрификации перспективным направлением является производство удобрений с контролируемым высвобождением питательных веществ в течение вегетации сельскохозяйственных культур. Поэтому важно уделять внимание не просто гранулированию минеральных удобрений, но и их капсулированию или покрытию гранул различными пленками (смолы, полиэтилен, винилацетат, парафин, элементная сера и др.), которые будут не только препятствовать быстрому растворению и потере азотных удобрений, но и могут замедлить взаимодействие фосфатов с почвой, снижая тем самым их химическое поглощение. По данным разных исследователей, коэффициент использования азота капсулированных удобрений выше на 20%, калия — на 65%, а фосфора — почти вдвое.

Для азотных удобрений актуальным остается производство малорастворимых (такие как МФУ и др.), а также капсулированных удобрений пролонгированного действия, однако основной проблемой в применении таких удобрений является дороговизна, сложность или невозможность регулирования высвобождения азота во времени применительно к фазам развития растений.

Введение в состав азотных удобрений ингибиторов нитрификации, которые способны на длительное время затормозить процесс окисления аммонийного азота почвы и удобрений,

сохраняя его в малоподвижной, но доступной для питания растений форме, снижает потери азота в 1,5–2,5 раза и повышает коэффициент использования на 10–15% и урожай на 10–42%. Средние прибавки урожая от применения ингибиторов нитрификации составляют по зерновым культурам 3,5–6,0 ц/га, кукурузы — 3,9–5,4, картофеля — 34, кормовой свеклы — до 42 ц/га. Также снижается потребность и затраты на проведение подкормок. Наиболее эффективным методом повышения действия азотных удобрений ингибиторы нитрификации являются в условиях орошаемого земледелия, при промывном водном режиме, на почвах легкого гранулометрического состава и при возделывании риса.

В целом к 90-м гг. XX в. в отрасли минеральных удобрений были исследованы и отработаны в промышленном масштабе технологии основных видов минеральных удобрений — азотные, фосфорные, калийные и комплексные. Исследованы основные и перспективные виды сырья и технологии его комплексного использования. В производстве каждого вида удобрений определились основные направления развития: технические, технологические, организационные. Установлена эффективность мелиорантов, мезо- и микроэлементов, органических и биологических добавок и т. д., определены основные агрохимические приемы повышения урожайности. Одну из решающих ролей в развитии производств стал играть экономический фактор — развитие внешней торговли определило новые требования к качеству и ассортименту удобрений, логистике, «гибкости» используемых технологий, экономическим показателям производства и др.

Указанные тенденции в итоге определили основную движущую силу развития отрасли в XXI в. — ресурсоэффективность производства и потребления удобрений.

Для оценки эффективности использования ресурсов представляется возможным применение теории Т. Гилберта (Т. Gilbert). Основное положение данной теории заключается в том, что люди должны стремиться минимально возможными усилиями достигать максимальных результатов, чтобы таким образом сэкономить возможности или ресурсы, в широком смысле этого слова (материальные, финансовые и временные ресурсы, силы, здоровье и т. д.), для других, возможно, более ценных для индивидуума и общества занятий.

Одна из классификаций выделяет пять основных групп ресурсов:

1. **Материальные** — природные и искусственные.
2. **Трудовые** — часть населения, обладающая физическим развитием и интеллектуальными (умственными) способностями, необходимыми для трудовой деятельности.
3. **Финансовые** — ресурсы для обеспечения капитальных вложений, наполнения оборотных средств, осуществления торговой деятельности и накоплений.
4. **Информационные** — ресурсы знаний и инфраструктура, обеспечивающая их хранение и использование.
5. **Временные** — ресурсы времени индивидуальные и институциональные.

Используя основные группы ресурсов, можно предложить соответствующую классификацию направлений развития удобрений с позиций ресурсоэффективности.

Эффективность использования материальных ресурсов

Эффективность использования природных ресурсов

Актуальной задачей остается комплексное и максимальное использование сырья:

- фосфатного сырья с получением фосфорсодержащих удобрений, фторсодержащих продуктов, редкоземельных элементов, стронцийсодержащих соединений, сырья для цементной промышленности и строительных материалов, технических и кормовых фосфатов;
- серы с получением серной кислоты, пара, электроэнергии;
- калийного сырья с получением калийных и сложных удобрений; технических, кормовых и пищевых натриевых солей; гидроксидов натрия и калия, хлора и соляной кислоты; максимальное использование вторичных ресурсов и вскрышных пород для закладки горных выработок;

– всестороннее использование сырья азотной промышленности — природного газа и воздуха с попутным получением электроэнергии, пара, диоксида углерода, карбамида, меламин, метанола и других продуктов (см. рис. 13.1).

Повышение эффективности удобрений с использованием следующих приемов:

- создание удобрений пролонгированного действия, удобрений с регулируемой растворимостью питательных веществ;
- создание комплексных удобрений с микро- и мезоэлементами, удобрений со стимуляторами роста растений, биологических удобрений и т. д.;
- агрохимические методы увеличения эффективности использования удобрений: севооборота, технические средства для равномерного внесения удобрений, комбинации использования минеральных удобрений с органическими удобрениями и мелиорантами и т. д.
- использование нетрадиционного и бедного сырья — совершенствование технологий добычи и обогащения с вовлечением труднодоступного, менее богатого и труднообогатимого сырья.

Эффективность использования искусственных ресурсов:

- использование вторичных энергоресурсов: тепла абсорбции в производстве серной кислоты, пара в производстве упаренной фосфорной кислоты, тепла химической реакции нейтрализации для упарки растворов аммиачной селитры и удобрений;
- использование вторичных материальных ресурсов, отходов, шлаков, осадков в производстве товарных продуктов: фосфогипса и осадка со станции нейтрализации в производстве цемента и строительных материалов; конверсионного мела в производстве бумаги и удобрений;
- разработка и использование энергоэффективного оборудования, более совершенного оборудования очистки выбросов и сбросов для уменьшения потерь целевых компонентов.

Эффективность использования трудовых ресурсов заключается в увеличении производительности труда, увеличении единичной мощности установок, оптимизации и автоматизации производственных процессов.

Эффективность использования финансовых ресурсов заключается в реализации высокоэффективных технологий с максимальным использованием сырьевых компонентов, полупродуктов и вторичных энергоресурсов; сокращении времени на реализацию и окупаемость проекта; создании продуктов с большой добавленной стоимостью (чистые / водорастворимые удобрения для гидропоники, кормовые фосфаты, бесхлорные удобрения и т. д.); вертикальной интеграции компаний, включая добычу сырья, производство удобрений, транспортировку и применение удобрений на собственных сельскохозяйственных предприятиях или отгрузку потребителю через развитую сеть региональных и зарубежных торговых представительств.

Эффективность использования информационных ресурсов — оптимизация производств с использованием цифровизации, автоматизации и работе с большими объемами данных; увеличение «интеллектуального капитала» компаний — собственные научно-исследовательские и проектные центры, патентование изобретений, полезных моделей, регистрация торговых марок; организационные мероприятия направленные на обучение, переподготовку и повышение квалификации сотрудников, создание базовых кафедр в вузах, поддержка одаренных студентов и молодых ученых, гранты на исследования и разработки.

Эффективность использования временных ресурсов заключается в достаточно широком понимании эффективного управления временем:

- быстрота реагирования на запросы рынка увеличивает конкурентоспособность компании — необходимо систематическое изучение конъюнктуры рынка с целью определения

- наиболее востребованных и перспективных видов удобрений, проведение исследований и разработка необходимого ассортимента, гибкость производства и сокращение времени на переход с одной марки на другую, развитие логистических цепочек, складов сырья и готового продукта, терминалов и перевалочных пунктов, портового хозяйства;
- снижение времени реализации проектов и их окупаемости;
 - вертикальная интеграция компаний с целью оптимизации управленческих решений, увеличения скорости принятия решений от добычи сырья до отгрузки готового продукта;
 - увеличение доступности удобрений для основных потребителей — развитие сети торговых представительств и филиалов компаний, организация производств вблизи основных потребителей, вблизи транспортной инфраструктуры (портов), развитие сети региональных тукосмесительных установок и складов готовой продукции.

Резюмируя вышесказанное, можно констатировать, что в условиях неуклонного роста мирового населения обеспечение человечества растениеводческой продукцией, а также кормовой базой сельскохозяйственных, при ограниченных и зачастую сокращающихся площадях сельхозугодий и ресурсах, возможно только за счет интенсификации земледелия, которая немыслима без дальнейшего увеличения объемов производства минеральных удобрений и повышения ресурсо- и энергоэффективности. Отечественная туковая промышленность, безусловно, способна не только экспортировать минеральные удобрения, но и полностью покрыть потребность в них внутри страны даже на отдаленную перспективу при освоении интенсивных и высоких агротехнологий. Таким образом, перспектива развития отрасли удобрений заключается в комплексном подходе к эффективности использования всех видов ресурсов.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Алейнов, Д. П.* Основные направления технического прогресса в азотной промышленности / Д. П. Алейнов // Химическая промышленность сегодня. — 2005. — № 9. — С. 3–16.
2. *Атрощенко, В. И.* Курс технологии связанного азота : учеб. для вузов / В. И. Атрощенко, А. М. Алексеев, А. П. Засорин [и др.] ; под ред. В. И. Атрощенко. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Химия, 1969. — 383 с.
3. *Атрощенко, В. И.* Технология азотной кислоты : учеб. пособие для вузов / В. И. Атрощенко, С. И. Каргин. — 3-е изд., перераб. и доп. — М. : Химия, 1970. — 494 с.
4. *Бабкин, В. В.* Фосфорные удобрения России / В. В. Бабкин, А. А. Бродский. — М. : ТОО «Агрохим-принт», 1995. — 464 с.
5. *Баранова, Л. А.* Экологически чистое азотное удобрение / Л. А. Баранова // Агрохимия. — 2013. — № 3 (22). — С. 15–18.
6. *Бласяк, Е.* Технология связанного азота. Синтетический аммиак / Е. Бласяк, К. Лайдлер, С. Павликовский [и др.]. — М. : Госхимиздат, 1961. — 623 с.
7. *Бонне, М.* Производство азотной кислоты в агрегатах большой единичной мощности / М. Бонне, Н. Д. Заичко, М. М. Караваев [и др.] ; под ред. В. М. Олевского. — М. : Химия, 1985. — 400 с.
8. *Волкова, А. В.* Рынок минеральных удобрений. 1 квартал 2017 года [электронный ресурс] / А. В. Волкова ; НИУ «ВШЭ», Центр развития. — 59 с. — URL: <https://dcenter.hse.ru/data/2017/07/26/1173626734/Рынок%20минеральных%20удобрений%20I%202017.pdf> (дата обращения: 23.10.2019).
9. *Галлямов, Г. Р.* О возможности использования отходов, образующихся при получении биогаза в качестве удобрения / Г. Р. Галлямов, В. М. Лапушкин, С. П. Торшин // Инновационные технологии в АПК: теория и практика : Мат-лы VI Всероссийской науч.-практ. конф., 2018. — С. 33–37.
10. *Ганз, С. Н.* Технологические процессы и оборудование производств синтез-газа и связанного азота : учеб. пособие для вузов / С. Н. Ганз ; под ред. В. И. Даля. — Харьков : Изд-во Харьк. Ордена трудового Красного знамени гос. ун-та им. А. М. Горького, 1960. — 550 с.
11. *Горловский, Д. М.* Технология карбамида / Д. М. Горловский, Л. Н. Альшулер, В. И. Кучерявый. — Л. : Химия. Ленингр. отд-ние, 1981. — 320 с.
12. *Гришаев, И. Г.* Способы аммонизации в технологии минеральных удобрений / И. Г. Гришаев, Л. З. Назирова, Б. Ф. Федюшкин. — М. : НИИТЭХИМ, 1988.

13. *Доходова, А. Н.* Производство и применение аммофоса / А. Н. Доходова, В. Ф. Кармышов, Л. В. Сидорина. — М. : Химия, 1977. — 240 с.
14. *Забелешинский, Ю. А.* Экономика производства минеральных удобрений / Э. М. Цыпина, Ю. А. Забелешинский, Т. П. Унанянц. — М. : Химия, 1975. — 278 с.
15. *Забелешинский, Ю. А.* Эффективность производства и применения минеральных удобрений / Ю. А. Забелешинский, Н. С. Корогодов, Э. И. Цыпина. — М. : Химия, 1980. — 271 с.
16. *Завалин, А. А.* Преимущества и проблемы применения жидких азотных удобрений в земледелии / А. А. Завалин, Е. Н. Ефремов, А. А. Алферов, Л. Н. Самойлов, Л. С. Чернова, Г. Г. Благовещенская // *Агрохимия*. — 2014. — № 5. — С. 20–26.
17. *Иванов, М. Е.* Производство аммиачной селитры в агрегатах большой единичной мощности / М. Е. Иванов, В. М. Олевский, Н. Н. Поляков [и др.] ; под ред. В. М. Олевского. — 2-е изд., доп. и перераб. — М. : Химия, 1990. — 286 с.
18. *Иванов, М. Е.* Технология аммиачной селитры / М. Е. Иванов, В. М. Олевский, Н. Н. Поляков [и др.] ; под ред. В. М. Олевского. — М. : Химия, 1978. — 311 с.
19. ИТС 2–2015 Производство аммиака, минеральных удобрений и неорганических кислот / Росстандарт. — М. : Бюро НДТ, 2015. — 909 с.
20. *Караваев, М. М.* Справочник азотчика: Производство азотной кислоты. Производство азотных удобрений. Материалы, компрессоры и газгольдеры. Энергоснабжение. Данные о развитии азотной промышленности. Техника безопасности / М. М. Караваев, А. К. Чернышев, А. Ф. Ильченко [и др.] ; под ред. Е. Я. Мельникова. — 2-е изд., перераб. — М. : Химия, 1987. — 464 с.
21. *Кармацких, А. А.* Обзор удобрений на основе мочевины с контролируемым высвобождением азота / А. А. Кармацких, Д. С. Редозубов // *Вестник ГАУ Северного Зауралья*. — 2017. — № 2 (37). — С. 63–66.
22. Кармышов, В. Ф. Химическая переработка фосфоритов / В. Ф. Кармышов. — М. : Химия, 1983. — 304 с.
23. *Кидин, В. В.* История агрохимии. учебное пособие / В. В. Кидин. — М. : Изд-во РГАУ-МСХА, 2013. — 270 с.
24. *Кирюшин, В. И.* Минеральные удобрения как ключевой фактор развития сельского хозяйства и оптимизации природопользования / В. И. Кирюшин // *Достижения науки и техники АПК*. — 2016. — Т. 30, № 3. — С. 19–25.
25. *Классен, П. В.* Основные процессы технологии минеральных удобрений / П. В. Классен, И. Г. Гришаев. — М. : Химия, 1990. — 304 с.
26. *Козел, Е. Г.* Эффективность применения новой формы капсулированной мочевины под столовую свеклу на выщелоченных черноземах тюменской области : автореф. ... дисс. канд. с.-х. наук : 06.01.06 / Е. Г. Козел. — Тюмень, 2000. — 17 с.
27. *Копылов, В. А.* Производство двойного суперфосфата / В. А. Копылов, Т. И. Завертеева, А. М. Андрейченко [и др.]. — М. : Химия, 1976. — 192 с.
28. *Копытова, Е. Д.* Тенденции развития отрасли минеральных удобрений в России / Е. Д. Копытова // *Социальное пространство*. — 2006. — № 4 (06). — С. 1–16.
29. *Кочетков, В. Н.* Фосфорсодержащие удобрения : справочник / В. Н. Кочетков. — М. : Химия, 1982. — 400 с.
30. *Кудинова, О.* Минеральные удобрения — текущая ситуация и прогноз / О. Кудинова // *The Chemical Journal*. — 2015. — ноябрь. — URL: <https://docplayer.ru/44173083-Mineralnye-udobreniya-tekushchaya-situaciya-i-prognoz.html> (дата обращения: 23.10.2019).
31. *Кузнецов, Л. Д.* Синтез аммиака / Л. Д. Кузнецов, Л. М. Дмитриенко, П. Д. Рабина [и др.] ; под ред. Л. Д. Кузнецова. — М. : Химия, 1982. — 296 с.
32. *Кучерявый, В. И.* Синтез и применение карбамида / В. И. Кучерявый, В. В. Лебедев. — Л. : Химия. Ленингр. отд-ние, 1970. — 448 с.
33. *Лапушкин, В. М.* Использование яровой пшеницы азота минеральных удобрений в зависимости от содержания подвижного фосфора в дерново-подзолистой среднесуглинистой почве / В. М. Лапушкин, В. А. Нестеренко // *Инновационные технологии в АПК: теория и практика* : Мат-лы VI Всероссийской науч.-практ. конф. — 2018. — С. 124–127.
34. *Лапушкин, В. М.* Современное состояние и перспективы развития применения минеральных удобрений в России / В. М. Лапушкин, С. П. Торшин, В. В. Кидин. — Мат-лы X междунар. науч.-практ. конф. «Современные тенденции в производстве и применении фосфорсодержащих удобрений и неорганических кислот». — М. : НИУИФ, 2015. — С. 5–11.
35. *Липин, А. Г.* Капсулирование гранул в полимерные оболочки как метод создания минеральных удобрений с регулируемой скоростью высвобождения питательных веществ / А. Г. Липин, В. О. Небукин, А. А. Липин // *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. — 2017. — № 3 (51). — С. 86–91.
36. *Мельников, Е. Я.* Технология неорганических веществ и минеральных удобрений : учеб. для техникумов / Е. Я. Мельников, В. П. Салтанова, А. М. Наумова [и др.]. — М. : Химия, 1983. — 432 с.
37. *Минеев, В. Г.* Агрохимия и биосфера / В. Г. Минеев. — М. : Колос, 1984. — 245 с.
38. *Новые формы удобрений* // НИИК [официальный веб-сайт]. — URL: <https://niik.ru/technology/new-forms-of-fertilizer/> (дата обращения: 23.10.2019). — Загл. с экрана.
39. *Овчаренко, М. М.* Агрохимия и плодородие / М. М. Овчаренко // *The Chemical Journal*. — 2014, нояб. — С. 22–25.

40. Патрикеева, Н. И. Развитие энергосберегающих процессов производства аммиака в капиталистических странах / Н. И. Патрикеева // Химическая промышленность. — 1990. — № 10. — С. 55–59.
41. Позин, М. Е. Технология минеральных удобрений / М. Е. Позин. — Л. : Химия. Ленингр. отд-ние, 1974. — 375 с.
42. Прогнозная оценка окупаемости минеральных удобрений прибавкой урожая картофеля в зависимости от агрохимических свойств почв. Нормативная документация / под ред. В. Г. Сычева ; ФАНО, ВНИИ агрохимии им. Д. Н. Прянишникова. — М., 2014. — 86 с.
43. Прянишников, Д. Н. Избранные сочинения : в 3 т. / Д. Н. Прянишников. — М. : Колос, 1965.
44. Развитие химической промышленности в СССР. 1917–1980 : в 2 т. Т. 2 : Развитие отдельных отраслей химической промышленности / под ред. Л. А. Костандова, Н. М. Жаворонкова. — М. : Наука, 1984. — 400 с.
45. Распоряжение Правительства РФ от 29 марта 2018 г. № 532-р «О плане мероприятий (“дорожная карта”) по развитию производства минеральных удобрений на период до 2025 года» // Гарант.ру : информационно-правовой портал. — 2018. — URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71811704/> (дата обращения: 23.10.2019).
46. Резванов, А. Краткий прогноз развития рынка удобрений в 2019 году / А. Резванов, А. Викторов // FertilizerDaily [сайт]. — 3 с. — URL: https://fertilizerdaily.ru/files/reports/fertilizerdaily_ru_2019_forecast.pdf (дата обращения: 23.10.2019).
47. Сабиров, А. А. Инновационные минеральные удобрения и установление их экономической эффективности в сельском хозяйстве / А. А. Сабиров, А. М. Сабиров, Р. Х. Хузиахметов, Е. И. Царегородцев // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). — 2015. — № 4 (13). — С. 164–167.
48. Сергеев, С. П. Аммиачные агрегаты в России (часть 1) / С. П. Сергеев // NewChemistry.ru. Новые химические технологии : аналитический портал. — URL: http://www.newchemistry.ru/letter.php?n_id=4659&cat_id=&sword=аммиачные агрегаты (дата обращения: 23.10.2019).
49. Шекунова, С. Ф. Система применения удобрений. Дипломное и курсовое проектирование: учебное пособие для студентов агроэкологического и агрономического факультетов / С. Ф. Шекунова, И. Р. Вильдфлуш, Т. Ф. Персикова, В. В. Лапа, Г. М. Сафроновская, С. П. Кукреш, С. Ф. Кукреш-Ходянкowa. — Горки : БГСХА, 2009. — 150 с.
50. События истории компании // Уралхим [официальный веб-сайт]. — [2018]. — URL: <http://www.uralchem.ru/about/history/> (дата обращения: 23.10.2019). — Загл. с экрана.
51. Соколовский, А. А. Краткий справочник по минеральным удобрениям / А. А. Соколовский, Т. П. Унанянц. — М. : Химия, 1977. — 376 с.
52. Соколовский, А. А. Технология минеральных удобрений и кислот / А. А. Соколовский, Е. В. Яшке. — М. : Химия, 1974. — 456 с.
53. Статистические материалы развития агропромышленного производства России. — М. : Россельхозакадемия, 2013. — 35 с.
54. Сычев, В. Г. Прогноз потребности сельского хозяйства России в минеральных удобрениях к 2030 г. / В. Г. Сычев, С. А. Шафран, Т. М. Духанина // Плодородие. — 2016. — № 2. — С. 5–7.
55. Торшин, С. П. Эффективность новых PKS-удобрений на дерново-подзолистых почвах при внесении их под яровой ячмень (вегетационные опыты) / С. П. Торшин, В. В. Соколов, В. М. Лапушкин, В. В. Кидин // Мат-лы международной науч.-практ. конф. «Агрохимикаты в XXI веке: теория и практика применения». ФГБОУ ВПО НГСХА, Н. Новгород, 31 мая — 2 июня 2017 г. — С. 142–145.
56. Филлюк, Г. Н. Получение и эффективность применения новой формы капсулированной мочевины под картофель на выщелоченном черноземе тюменской области : автореф. ... дисс. канд. с.-х. наук : 06.01.04 / Г. Н. Филлюк. — Тюмень, 2014. — 21 с.
57. «ФосАгро» обсудила перспективы развития отрасли минеральных удобрений и АПК с ведущими российскими научными организациями // «ФосАгро» [официальный веб-сайт]. — 2018. — URL: <https://www.phosagro.ru/press/company/item16584.php> (дата обращения: 23.10.2019). — Загл. с экрана.
58. Химизация сельского хозяйства (экономическо-статистический сборник). — Вып. 5. — М. : НИИТЭХИМ, 1982. — 216 с.
59. Эвенчик, С. Д. Технология фосфорных и комплексных удобрений / С. Д. Эвенчик, А. А. Бродский. — М. : Химия, 1987. — 464 с.

ПРОИЗВОДСТВО ЦЕЛЛЮЛОЗЫ, ДРЕВЕСНОЙ МАССЫ, БУМАГИ, КАРТОНА

Анатолий Максимович Кряжев

ООО «Адвис плюс», главный технолог, доктор технических наук

Екатерина Андреевна Фрундина

Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики»,
специалист отдела стандартизации, методологии и оценки НДТ

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с ISO/CD 4046–4 «бумага» является общим термином для материалов в виде сплошного листа или полотна, получаемых осаждением растительных, минеральных, синтетических волокон или их смесей из жидких суспензий на соответствующих формующих устройствах с добавлением или без добавления других веществ. На эти материалы можно наносить покрытия, их можно пропитывать в процессе изготовления и по окончании его, при этом материалы не теряют своей тождественности бумаге. В классическом «мокром» процессе производства бумаги в качестве жидкости используется вода.

Не существует четкого различия между понятиями «бумага» и «картон».

Картон — это материал, также состоящий преимущественно из растительных волокон, отличающийся от бумаги большей толщиной и массой квадратного метра, под понятием «картон» условно принято считать материал, имеющий массу 1 м² более 250 г и толщину более 0,5 мм. Объемная масса бумаги колеблется в пределах 0,40–1,35 г/см³. Поэтому правомерно в отдельных случаях выбирать термин с учетом свойств материала, области его применения или существующей традиции, а иногда термин «бумага» использовать для описания как бумаги, так и картона.

Классификацию бумаги и картона как в мировой, так и отечественной практике проводят по различным признакам: целевому назначению, главному потребительскому свойству, особым характеристикам продукции, специфике технологии ее получения, потребительскому спросу и т. д. В настоящее время пока нет единой международной системы классификации бумажной продукции.

В российских нормативных документах стандартная классификация бумаги приведена в ГОСТ 17586–80:

- бумага для печати: газетная, типографская, офсетная, для глубокой печати, мелованная, картографическая, документная, обложечная, афишная, билетная, этикеточная, для обоев, для игральные карт;
- бумага для письма, черчения и рисования: акварельная, бристолевая, бумажная натуральная калька, ватман, верже, для карточек, для почтовых документов, копировальная, машинописная, писчая для письма чернилами, почтовая, прозрачная чертежная, рисовальная, тетрадная, цветная писчая, чертежная;
- декоративная бумага: аэрографная, бархатная, крепированная декоративная, перламутровая, цветная глянцевая, шагреновая, для оклейки переплетов белых изделий;
- электротехническая бумага: изоляционная, электроизоляционная (пропиточная, намоточная, асбестовая, бакелитизированная), кабельная (крепированная, водонепроницаемая, полупроводящая), телефонная, конденсаторная (для электролитических

- конденсаторов), для электроизоляционных трубок, оклейки электротехнической стали, электропроводящая, крепированная электротехническая, сепараторная;
- оберточная и упаковочная бумага: антикоррозионная, графитная, бандерольная, для упаковки продуктов на автоматах (чая, сахара, фруктов, стеклянной тары, мануфактуры), мешочная, крепированная упаковочная, парафинированная, для упаковки папирос и сигарет, прокладочная (для линолеума, для резиновой обуви), светонепроницаемая для кинофотоматериалов, жиронепроницаемая, биостойкая, битумированная, двухслойная упаковочная, оберточная, растительный пергамент, пергамин, подпергамент;
 - светочувствительная и переходная бумага: diaзотипная позитивная светочувствительная, светочувствительная diaзотропная калька, белая переводная, автографская, гуммированная для переводных изображений;
 - бумага для изготовления папирос и сигарет: курительная, мундштучная, фильтрующая мундштучная, папиросная, сигаретная;
 - впитывающая бумага: для хроматографии и электрофореза, ионообменная для хроматографии и электрофореза, для капельного анализа, промокательная, фильтровальная, быстрофильтрующая, среднефильтрующая, медленнофильтрующая, лабораторная фильтровальная, для фильтрации растворов ацетилцеллюлозы, для фильтрации смазочно-охлаждающих жидкостей;
 - промышленно-техническая бумага разного назначения: для окиснортутных элементов, для химических источников тока, каландровая, для патронирования, шпульная, шпагатная, для гофрирования, для копирования, биоцидная, бактерицидная, инсектицидная, фунгицидная, для мульчирования, трафаретная, абажурная, для фотоальбомов, для изделий бытового и санитарно-гигиенического назначения (гигиеническая, крепированная медицинская).

Стандартная классификация картона в ГОСТ 17926–80:

- тарный картон: гофрированный, для плоских слоев гофрирования, коробочный, термосвариваемый;
- картон для полиграфического производства: переплетный, цветной склеенный, для стереотипных матриц, билетный;
- фильтровальный картон: для фильтрации нефтепродуктов и технических масел, для фильтрования дизельного топлива, для фильтрования вин, для фильтрования воздуха, противопыльный;
- картон для легкой промышленности: обувной, геленок, стелечный, для задников, для платформ, простилочный, чемоданный, околышный;
- технический картон: водонепроницаемый, обивочный водостойкий, для радиотехнической промышленности, прокладочный, термоизоляционный прокладочный, шпульный, жаккардовый, заменитель фибры, электроизоляционных, электроизоляционных для работы в масляной среде, электроизоляционный для работы в воздушной среде, оксидный электроизоляционный, огнестойкий, прессшпан, циферблатный;
- строительный картон: кровельный, облицовочный.

Технический прогресс изменяет потребительский спрос и ассортимент вырабатываемой продукции, поэтому требуется постоянная корректировка классификации бумаги и картона. Например, в середине прошлого столетия бурное развитие получила электротехническая промышленность и потребовалось бумажную продукцию этого назначения выделить в самостоятельную группу, в которой ведущее положение заняли марки электроизоляционной, кабельной и конденсаторной бумаги. С изменением технологии в настоящее время эта продукция уже утрачивает свое значение, поскольку электроизоляционная бумага заменяется синтетическими изоляторами, конденсаторная — металлизированными пленками, телефонные кабели — оптическими. Поэтому в этой группе бумажной продукции ведущую роль уже играют электропроводящие виды бумаги и картона.

Технические изменения последних десятилетий, в том числе интенсивное внедрение электронной техники и информационных технологий, оказали влияние на ассортимент бумажной продукции, в частности появился новый класс бумаг для офисной техники. Произошло изменение на бытовом уровне, и поэтому значительно расширился ассортимент упаковочных видов бумаги, тарного картона, бумаг санитарно-гигиенического и медицинского назначения и некоторых других.

ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

На рис. 14.1 представлена схема производства продукции в целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП). В качестве сырья используется балансовая древесина, товарная щепка из отходов лесопиления, макулатура, а также недревесное сырье (солома культурных злаков; трава, например, эспарто; хлопок, лен, конопля, джут и тряпье, их содержащее; дикорастущие однолетние растения — камыш, тростник и пр.). Из древесного и недревесного сырья производят первичные волокнистые полуфабрикаты, а из макулатурного сырья — вторичные волокна. Полученные на целлюлозно-бумажных комбинатах (ЦБК) первичные волокнистые полуфабрикаты передаются на собственное производство бумаги и картона (интегрированное производство) или поступают на рынок в виде товарных полуфабрикатов. Вторичные волокна в основном используются в собственном производстве бумаги, картона, а также для получения литой бумажной тары (упаковка для яиц, электроники, приборов и т. д.).

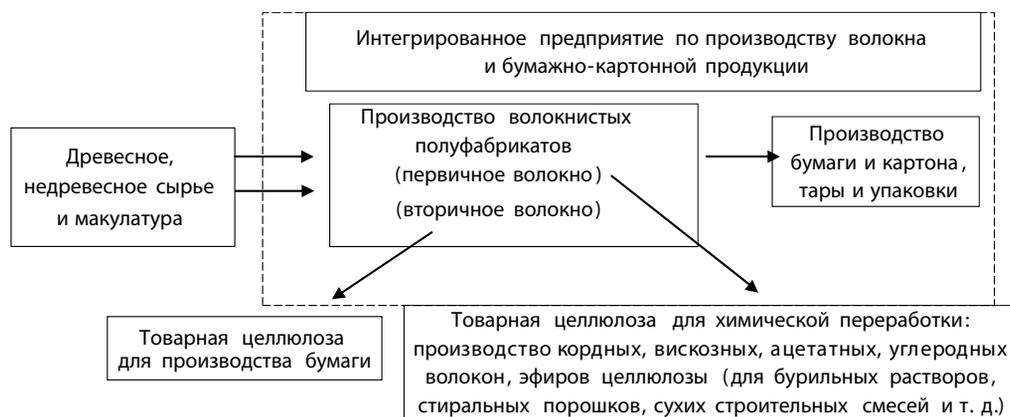


Рис. 14.1. Схема производства продукции в целлюлозно-бумажной промышленности

В целлюлозно-бумажной промышленности под отдельным целлюлозным волокном подразумевается единичная клетка, выделенная из древесины или недревесного растительного сырья. В растительном сырье целлюлозные клетки соединены между собой в древесную ткань межклеточным веществом (лигнином), поэтому для разделения древесной ткани на отдельные волокна используют три основных способа: механический, комбинированный химико-механический и химический. В табл. 14.1 приведена классификация способов производства волокнистых полуфабрикатов из древесного сырья. Следует отметить, что волокнистый полуфабрикат высокого выхода (90–98%), получаемый механической обработкой древесного сырья, называют механической (древесной) массой. Полуфабрикат, производимый комбинацией химической и механической обработки, называют полуцеллюлозой, которая имеет промежуточный выход волокна 55–90%. Волокнистый полуфабрикат, получаемый сульфитной или сульфатной варкой растительного сырья, обозначают термином «техническая целлюлоза» (для отличия от целлюлозы, находящейся в древесине), выход которого составляет 40–55%.

Таблица 14.1. Классификация способов производства волокнистых полуфабрикатов из древесного сырья

Механический	Комбинированный	Химический
Производство волокон за счет механической энергии	Производство волокон комбинацией химической и механической обработок	Производство волокон химической обработкой
Вид волокнистого полуфабриката и оптимальная порода древесного сырья		
ДДМ — дефибрерная древесная масса из коротких бревен древесины ели	НСПЦ — нейтрально-сульфитная полуцеллюлоза из щепы древесины березы и осины	Сульфатная целлюлоза, полученная по щелочному способу варки щепы древесины хвойных и лиственных пород
РММ — рафинерная древесная масса из щепы древесины ели	Варка с зеленым щелоком	Сульфитная целлюлоза, полученная по кислотному способу варки щепы, преимущественно древесины ели
ТММ — термомеханическая масса из щепы древесины ели		
ХТММ — химико-термомеханическая масса из щепы древесины ели и осины		
БХТММ — беленая химико-термомеханическая масса из щепы древесины ели и осины		
Выход волокнистого полуфабриката из древесного сырья		
Высокий выход (90–98%)	Средний выход (55–90%)	Низкий выход (40–55%)
Свойства волокон и бумаги		
Волокнистая масса содержит значительное количество мелочи и волокон средних фракций, что приводит к низким механическим свойствам бумаги, но бумага обладает хорошими печатными свойствами. В массе содержится 100% лигнина, который под воздействием солнечного света приводит к пожелтению бумаги. Поэтому бумага из древесной массы используется в продукции с коротким жизненным циклом (газеты, еженедельные издания и пр.)	Промежуточные размеры волокон между древесной массой и химической целлюлозой. Используется в производстве картона	Природная длина целлюлозного волокна сохраняется, что гарантирует высокие механические свойства бумаги. Низкое содержание лигнина ~ 0,2% обеспечивает устойчивую белизну бумаги при солнечной радиации
Низкие механические свойства бумаги		Высокие механические свойства бумаги
Хорошие печатные свойства		Низкие печатные свойства

Большая часть первичных товарных полуфабрикатов производится для бумажно-картонной продукции и только небольшая часть волокнистого сырья порядка 3,5–5 млн т в мире ежегодно используется для химической переработки.

Для производства бумаги и картона широко применяют макулатурное (вторичное) волокно, получаемое в процессе переработки макулатуры. Марки макулатуры и их состав представлены по ГОСТ 10700–97 «Макулатура бумажная и картонная. Технические условия». В 2011–2018 гг. среднелюдое потребление бумаги и картона в России подросло до 46 кг, однако оно значительно уступает ведущим развитым странам. Кроме того, собираемость макулатуры в России также низкая и составляет около 25%, тогда как в Европе — 75% и США — 65%. Поэтому недостаточный уровень потребления и сбора макулатуры в нашей стране сфокусировали подготовку макулатурных волокон, главным образом, на более простой технологии производства санитарно-гигиенических и тароупаковочных видов продукции. Естественно, меньшая доля использования вторичного волокна в композиции бумаги и картона увеличивает себестоимость продукции.

ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНЫЕ ПРЕДПРИЯТИЯ РОССИИ

В 2018 г. в России действуют 132 целлюлозно-бумажных предприятия. Крупнейшие заводы — всего их около 20 — расположены в Архангельской, Иркутской, Нижегородской областях, Республике Карелия, Марий Эл и Коми, Пермском крае. На рис. 14.2 представлена структура предприятий ЦБП России и производство продукции в 2018 г. Как видно из рис. 14.2, на 18 предприятиях с годовой производительностью более 100 тыс. т. произведено 82% продукции, на 15 предприятиях с годовой мощностью 50–100 тыс. т выработано 9% продукции, а на 99 предприятиях мощностью менее 20 до 50 тыс. т также произведено 9% продукции.

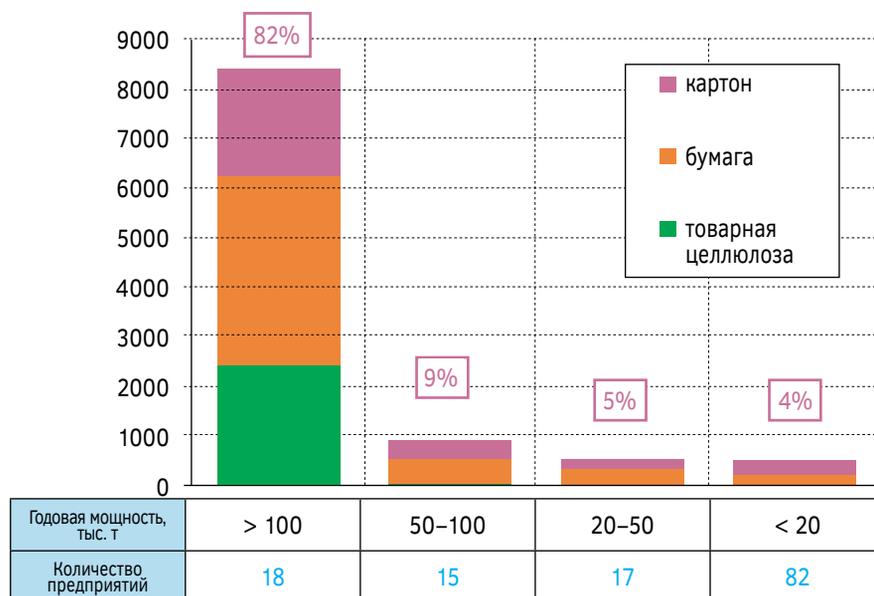


Рис. 14.2. Структура предприятий ЦБП России и производство продукции в 2018 г.

Источник: Росстат, обработка РАО Бумпром

В нашей стране пять крупнейших производителей целлюлозы: филиалы АО «Группы «Илим»» в г. Коряжме (1,3 млн т), в г. Братске (1,2 млн т) и в г. Усть-Илимске (0,82 млн т), АО «Монди Сыктывкарский ЛПК» (1,0 млн т) и АО «Архангельский ЦБК» (0,8 млн т). В 2017 г. после завершения модернизации на АО Сегежский ЦБК (входит в состав Segezha Group корпорации АФК Система) объем варки целлюлозы превысил 400 тыс. т/год, тогда как остальные целлюлозные предприятия России имеют производительность от 50 до 100 тыс. т (рис. 14.3, табл. 14.2).

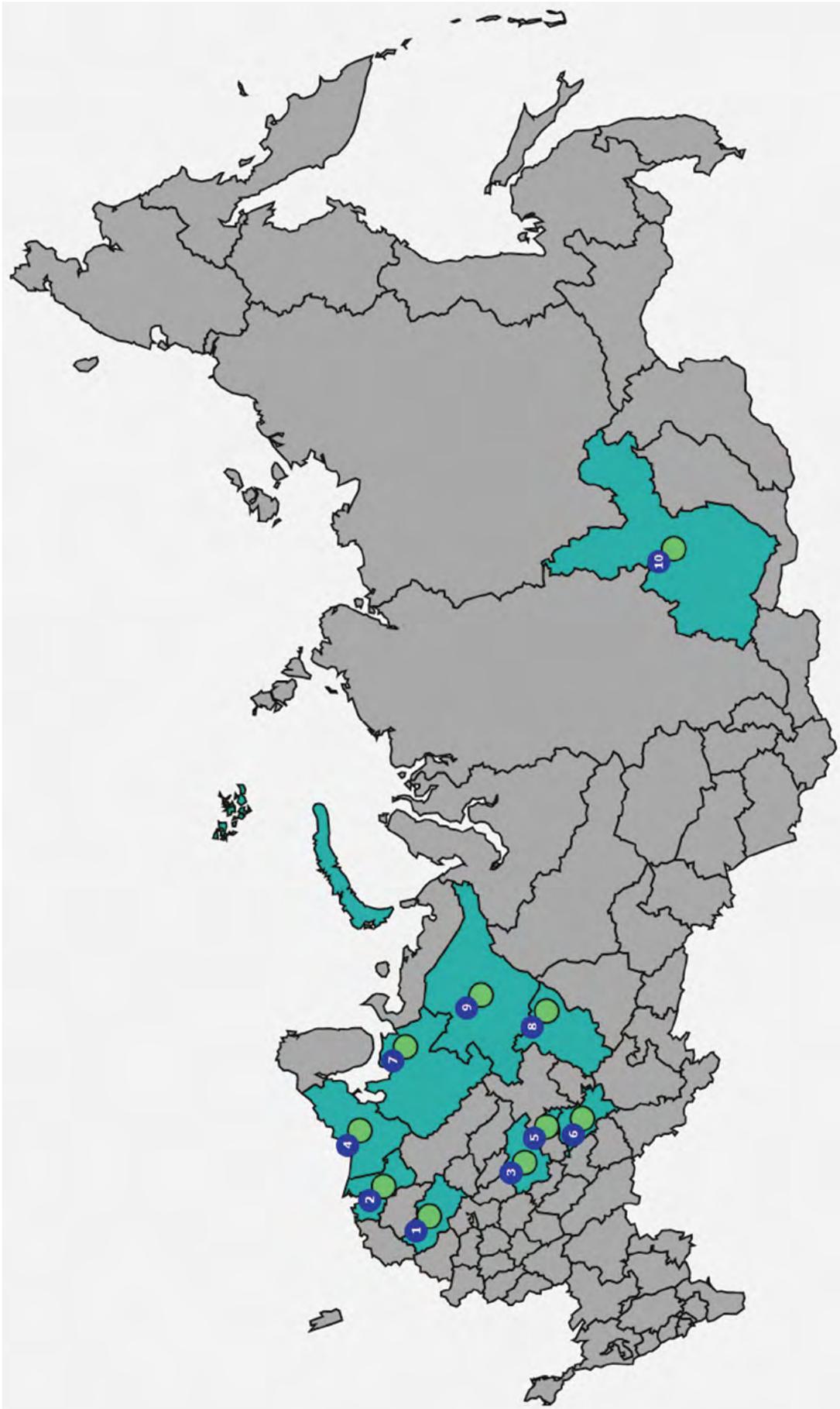


Рис. 14.3. Карта-схема расположения ведущих предприятий ЦБП Российской Федерации

Таблица 14.2. Ведущие предприятия ЦБП Российской Федерации

№ на карте	Субъект Российской Федерации	Наименование предприятия
1	Тверская область	ОАО «Каменская БКФ»
2	Ленинградская область	АО «Кнауф Петроборд» ОАО «Сясьский ЦБК» ЗАО «Интернешнл Пейпер»
3	Нижегородская область	АО «Волга»
4	Республика Карелия	ОАО «Кондопога» АО «Сегежский ЦБК»
5	Республика Марий Эл	АО «Марийский ЦБК»
6	Республика Татарстан	ЗАОР «Набережночелнинский КБК»
7	Архангельская область	Филиал Группы «ИЛИМ» в Коряжме АО «Архангельский ЦБК»
8	Пермский край	АО «Соликамскбумпром» ЗАО «Пермская ЦБК»
9	Республика Коми	АО «Монди Сыктывкарский ЛПК»
10	Иркутская область	Филиал Группы «ИЛИМ» в Братске Филиал Группы «ИЛИМ» в Усть-Илимске

В начале XXI в. вектор развития отечественной ЦБП характеризуется отсутствием строительства новых комбинатов в «чистом поле». Новые предприятия полного цикла — от подготовки щепы до упаковки товарной продукции — строят на уже существующих производственных площадках, что сокращает капитальные затраты на инфраструктурные проекты (новые электрические сети, дороги; жилищное строительство и т. д.). Однако такой подход не развивает другие лесные регионы страны. Целлюлозно-бумажная промышленность является исключительно капиталоемким производством, поэтому сроки окупаемости проектов реконструкции, в том числе при переходе на наилучшие доступные технологии (НДТ), во многом определяют производственные мощности предприятия, и чем больше выпуск товарной продукции, тем короче срок окупаемости инвестиционного проекта.

Ведущие предприятия России с объемами производства свыше 100 тыс. т продукции в год (данные РАО «Бумпром») представлены в 10 субъектах Российской Федерации (рис. 14.3, табл. 14.2).

ИСТОРИЯ ЗАРОЖДЕНИЯ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Появление бумаги и ее производство в мире

Из предшественников бумаги, сведения о которых дошли до наших дней, были глиняные плитки, папирус и животный пергамент.

Археологи при раскопках крупнейшей библиотеки древнего мира ассирийского царя Ашшурбанипала, жившего 2600 лет назад, нашли несколько десятков тысяч глиняных плиток. «Глиняные» книги были исключительно громоздкими и тяжелыми. Однако на глиняных плитках писали вплоть до III в.

Изготовление папируса возникло в древнем Египте 3500 лет до н. э., и он стал удобным носителем письменной информации, поскольку книги из папируса представляли собой

свитки и по сравнению с глиняными плитками были легкими и требовали меньше места в библиотеках. Расширение торговых связей между государствами, развитие литературы, науки и искусства вызвало рост потребности в папирусах, и их производство быстро увеличивалось. Папирусы стали известны и в Древней Греции, и в Риме, но в V в. применение папируса сократилось, а в IX в. и вовсе потеряло практическое значение.

Пергамент — материал для письма из недубленной сыромятной кожи животных. Получил название по имени города Пергам (Пергамское царство, Малая Азия), в котором во II в. до н. э. началось его производство. Пергамент делали из кожи молодых животных. Обработанную окончательно кожу проклеивали животным клеем, натягивали и сушили, разглаживая брусками из твердого дерева. Листы пергамента склеивали в одну полосу и хранили в виде рулонов. В дальнейшем пергамент стали разрезать на отдельные листы. Но пергамент был слишком дорог, поскольку на одну книгу шла кожа целого стада. Пергамент применяли до XII в., когда в Европу пришло производство бумаги. Однако благодаря высокому качеству и долговечности пергамента его еще долго использовали для особо важных документов.

Первое упоминание о бумаге, которая была изобретена в Китае, относится к 12 г. н. э. и первый лист бумаги был изготовлен из волокон пеньки и шелка, а уже в 76 г. н. э. впервые упоминается об изготовлении в Китае книг из бумаги.

Недостатком папируса было то, что в производстве листа целиком использовалась природная ткань луба тростника, нарезаемая узкими тонкими полосками, которые укладывались вдоль и поперек листа. Другой существенный недостаток папируса — географическая привязанность его к дельте Нила, в которой он растет. В отличие от папируса, бумажный лист изготавливается из отдельных волокон любого происхождения. Из предварительно разбавленной волокнистой суспензии лист получают ее обезвоживанием на сетке. Этот способ изготовления бумаги из размельченных волокон шелка, пакли, коры шелковицы, луба молодого бамбука и тряпья относят к 105 г., и приписывают Цай Луню. В более поздней китайской летописи сказано: «Всякий высоко ценит деятельность Цай Луня: он изобрел производство бумаги, и слава его живет до сих пор... Во всем мире еще и теперь делается бумага из *ветвей деревьев*».

Цай Лунь действительно совершил великое открытие, обладавшее неоспоримыми преимуществами перед ранее существовавшим способом изготовления бумаги в Китае. Долгое время считалось, что первая бумага появилась в 12 г. н. э., т. е. при жизни Христа, и сырьем для ее производства служили шелк и пенька. Однако археологические раскопки 1957 г., проведенные в провинции Шэньси, продемонстрировали образцы бумаги, возраст которой мог быть отнесен к I или даже ко II в. до н. э. Но это не умаляет заслуг Цай Луня, который впервые изготовил бумагу высокого качества и доказал, что для ее изготовления можно использовать любое растительное сырье, а также волокнистые отходы.

Китайцы пытались хранить секрет изготовления бумаги как государственную тайну. Тайна хранилась почти 500 лет, но неминуемо должна была раскрыться. Священные тексты Будды стали распространяться по всей стране на бумаге и вполне естественным образом попали к соседям — корейцам и японцам. Корея узнала «государственный секрет» в V в., но ничего нового в технологию изготовления бумаги не внесла. Впервые в Индии и Вьетнаме в V в. получили бумагу из вторичного сырья: льняного, пенькового тряпья и старых парусов, что можно считать первым шагом в области переработки вторичных ресурсов с целью выработки бумаги.

В Японию бумага попала в начале VII в., и ее мастера оказались на высоте. Они внесли много усовершенствований в технологию производства, благодаря чему появились различные виды декоративной бумаги. Япония оказалась первой страной, где бумага стала широко использоваться для изготовления предметов домашнего обихода. Первый маркетинговый ход в области производства бумаги и первое плантационное выращивание древесного сырья были сделаны сыном микадо (императора Японии) Тайши. Император издал указ об изготовлении бумаги только из коры шелковицы, для этого он приказал насадить шелковичные рощи по всей стране. По некоторым данным, Тайши был еще и ученым. Он выяснил, что бумага из коры шелковицы лучше китайской бамбуковой: она получилась более плотной, прочной, а главное, гибкой.

Почти в то же время бумажное производство началось в арабском мире. Самарканд, бывший столицей Согдианы, стал первым мусульманским городом, изготовившим бумагу. Несколько позже легендарный халиф Харун ар-Рашид (776–809) повелел повсеместно использовать бумагу для делопроизводства, что потребовало увеличить объем ее выработки.

Появление большого количества бумаги в арабском мире во многом способствовало перенесению на удобный носитель многочисленных сказок и легенд. И вскоре появился популярный сборник народных сказок, в которых частым героем был Харун ар-Рашид и популярный вольнодумец Абу Нувас. Так начало складываться знаменитое собрание сказок «Тысяча и одна ночь».

В 868 г. в Китае изготовлена первая печатная книга — «Бриллиантовая сутра», древнейшая из сохранившихся печатных книг, а в 970 г. в Китае выпущены бумажные деньги.

В Европе производство бумаги началось только в 1150 г. в Испании в г. Валенсия, принадлежавшей арабам. Затем бумажное производство в 1190 г. продвинулось во Францию (г. Геро), позднее, в 1260 г., в Италию (г. Фабриано). Итальянцы предложили толчею для повышения производительности размола тряпья, а для прессования влажных листов стали использовать винтовые прессы.

Первый на Руси документ, написанный на бумаге, — Договорная грамота московского Великого князя Симеона Гордого с братьями — появился в 1341 г., а в 1381 г. вышла первая книга на бумаге — «Почтения Исаака Сирина». На Руси в ту пору в делопроизводстве и быту широко использовалась береста. Собственное производство бумаги началось лишь в XIV, а по некоторым сведениям — в середине XVI в. Позднее появление в русском государстве бумажных производств до некоторой степени объяснялось дешевизной бересты и малочисленностью населения.

В Европе продолжается рост производства бумаги, и в 1370 г. начато производство в Средней Европе в г. Аша и в Германии в 1389 г. Первый магазин, торгующий бумагой, открылся в 1394 г. в Италии, в г. Милане. В 1407 г. началось производство бумаги в Бельгии, а в 1411 г. — в Швейцарии в г. Марли.

В 1453 г. немецкий изобретатель Иоганн Гутенберг создал способ книгопечатания подвижными литерами, который перевернул всю европейскую культуру и подарил ей возможность небывалого взлета. Он напечатал 180 экземпляров 1272-страничной Библии, из которых 135 экземпляров было отпечатано на первосортной итальянской бумаге, а на пергаменте — только 45, и стоили они дороже. Так в XV в. бумага одержала безоговорочную победу в конкурентной борьбе с животным пергаментом, а Иоганн Гутенберг за заслуги перед человечеством был признан ЮНЕСКО человеком тысячелетия.

В Средние века бумажники были уважаемыми людьми и считались служителями искусства. В университетах того времени к ним обращались не иначе как «почтеннейший и высокоискуснейший господин бумажный мастер». И как не вспомнить замечательные слова, посвященные в XVI в. бумаге: «Бумага — орудие ученых, основа для книг, домашний советник канцеляриста, сокровище учеников, фундамент человеческой дружбы».

Необходимо отметить, что производство технической целлюлозы из древесного сырья началось всего ~ 150 лет назад (рис. 14.4).

Что же ранее служило источником сырья для производства бумаги? Обратимся к энциклопедии Брокгауза и Эфрона, изданной в 1890 г.: «...Лучший материал доставляют тряпки изношенных хлопчатобумажных и льняных тканей. Но так как их не хватает, то берутся суррогаты, как-то: дерево, солома злаков и бобовых, тростники, сено, чемерица, крапива, репейник, шильник, волчье лыко, кора акации, липы и ольхи, стебли конопли и мака, древесные листья, муравьиная трава, папоротник, луб папируса, бамбука и шелковицы, сырой хлопок, сахарный тростник, пальмы, алое, альфа, пизанг, джут, юкка, шерсть, шелк, кожа, асбест и торф». Добавим, что белизна бумаги определялась исключительно выбором белого тряпья. Загрязненное и цветное тряпье использовалось только для производства оберточных, переплетных и других видов бумаги. «Луговая отбелка» (отбелка в поле, на траве) была слишком дорогим процессом и поэтому для отбелки бумажной массы не применялась (рис. 14.5).

Без малого две тысячи лет помимо текстильных волокон и хлопка сырца в производстве бумаги использовали однолетние растения, а также луб коры деревьев. Луб механически отделяли от корки коры и варили в течение нескольких часов в открытых чанах с золой или известковым молоком. Затем промывали водой и молотком расщепляли на отдельные волокна. Сама древесина химической переработке не подвергалась. И это не удивительно, поскольку к началу XIX в. о строении и, соответственно, о свойствах древесины почти ничего не было известно. Помимо отсутствия знаний не было налажено крупномасштабное промышленное производство необходимых химических реагентов, в частности щелочи.

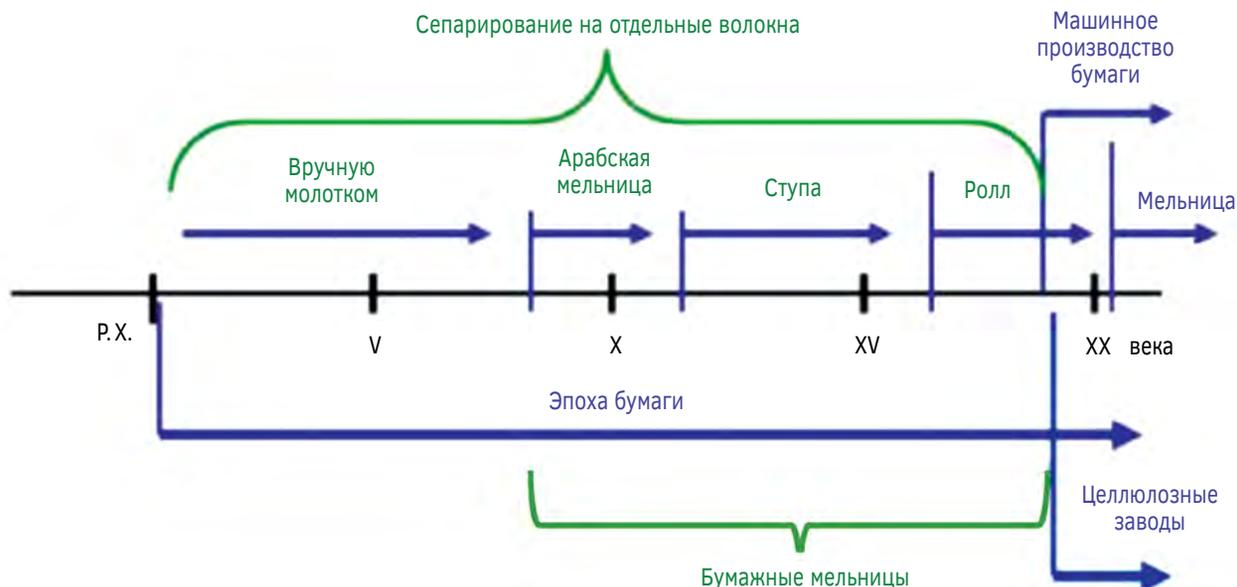


Рис. 14.4. Технические усовершенствования в производстве волокнистого полуфабриката для получения бумаги

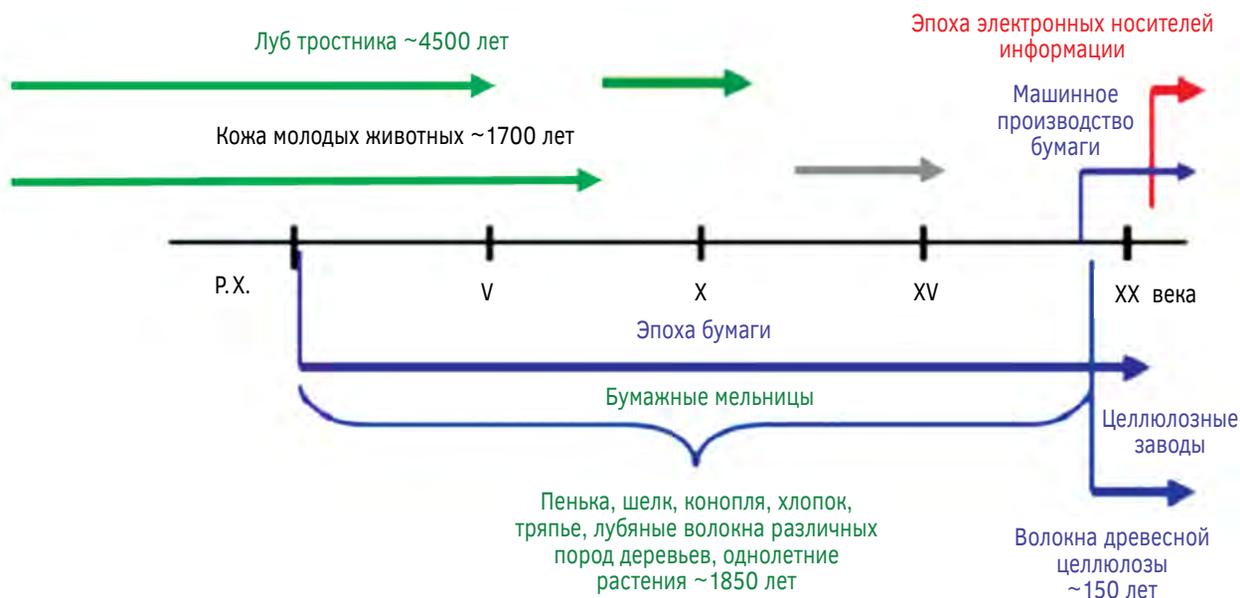


Рис. 14.5. Источники сырья для производства письменных носителей информации

В том самом 1799 г., когда армия Суворова штурмовала Альпы, служащий бумажной мануфактуры в Эссоне Н. Л. Робер предложил механизировать отлив бумаги на бумагоделательной машине — самочерпке. Деревянный механизм с ручным приводом занял площадь 4,5 м². Между стойками машины располагался чан, обтянутый железными обручами. Два валика огибала медная сетка. С поворотом привода сетка приходила в движение вместе с крылаткой, черпавшей из чана на нее бумажную массу. Вода стекала через ячейки сетки, на которой оставался тонкий слой переплетенных волокон. Влажное бумажное полотно отжимали между обтянутыми сукном валиками и наматывали на приемный вал. Разрезанные листы сушили на веревках. Первая машина имела ширину в 0,64 м, работала со скоростью 5 м/мин и давала 100 кг бумаги в сутки.

Братья Фурдринье купили патент Робера и усовершенствовали изобретение француза, и в Англии в 1806 г. была запатентована машина, состоявшая из нескольких отливных форм, последовательно двигавшихся друг за другом. Значительно упростила процесс производства бумаги ее проклейка непосредственно в бумажной массе, которую в 1807 г. предложил изобретатель Мориц Фридрих Иллинг, заменившая поверхностную обработку клеем каждого листа. Англичанин Джон Дикинсон в 1809 г. запатентовал первую круглосеточную (барабанную) бумагоделательную машину, и уже через пять лет на бумаге, полученной на круглосеточной машине, выпустили газету.

Первые бумагоделательные машины лишь формовали и прессовали бумажное полотно, а сушили бумагу, как и раньше, на воздухе. Только в 1823 г. появились сушильные цилиндры с угольными жаровнями. Позднее для их нагрева стали использовать пар, что упростило и механизировало процесс сушки. Еще через два года под сетку машины поместили отсасывающие ящики с вакуумными насосами, что увеличило скорость обезвоживания на сетке, а в 1825 г. на бумажные машины установили ровнительные валики для механического нанесения водяных знаков.

В течение долгого времени древесное вещество считали простым углеводом и только в 1838 г. в древесной ткани впервые выделили целлюлозу и «инкрустирующие вещества». Это было первым шагом в исследовании строения древесного вещества, которое получило название древесной ткани и стало основой для поиска способов ее разделения на отдельные волокна.

С появлением в начале XIX в. первых бумагоделательных машин потребовалось больше волокнистого сырья, источником которого в основном было тряпье. С каждым годом потребность в сырье для производства бумаги увеличивалась и на помощь бумажникам пришла древесина. В 1843 г. Фридрих Готлиб Келлер из Саксонии первый получил древесную массу, прижав для разволокнения древесину тополя к шлифовальному кругу, а в 1845 г. — первую бумагу в композиции 60% древесная масса и 40% ветоши. В 1852 г. построили две первые промышленные машины для производства дефибрерной древесной массы (ДДМ), что стало началом промышленного производства механической массы из древесного сырья.

В 1851 г. в США появилась первая банковская карта, началась эпоха постепенной замены бумажных денег.

В 1853 г. для удаления «инкрустирующих веществ» был предложен натронный способ варки, который стал первым химическим способом получения целлюлозы из древесины. Первый завод по производству целлюлозы натронным способом построили в США в 1860 г.

В 1854 г. Отмар Мергенталер разработал первую работоспособную наборную машину и обеспечил головокружительный рост спроса на газетную бумагу. Писатель Марк Твен вложил почти все свое состояние в работоспособное, но слишком сложное устройство — и все потерял.

В 1856 г. Франке изобрел цилиндрические узлоловители для очистки массы, которые значительно улучшили ее качество и сократили затраты на ее подготовку.

Ученые в 1857 г. обнаружили в древесине окисляемую субстанцию, которая получила название лигнин. Это послужило основой для поиска различных химических способов

выделения целлюлозы за счет растворения лигнина. Уже в 1863 г. был выдан один из первых патентов на метод кислотной делигнификации, посредством которой древесная ткань распалась на отдельные волокна (клетки), а в 1870-е гг. построили первые сульфитцеллюлозные заводы в Швеции и Германии.

Бумага проникает во все сферы жизни человека и ее нужно все больше и больше. Когда в 1882 г. С. Ф. Далем был открыт сульфатный способ варки целлюлозы, в котором он предложил восполнять потери щелочи сульфатом натрия, который имеется в природе, то очень скоро, в 1885 г., в Швеции построили первый сульфатцеллюлозный завод. В США первый завод по производству сульфитной целлюлозы построили в 1884 г. В этой стране в 1871 г. впервые появилась туалетная бумага и получен первый патент на бумажные полотенца.

Производство целлюлозы из древесины требует большого объема древесного сырья, и в 1892 г. для механизации процесса окорки древесины впервые запатентован способ ее проведения во вращающемся барабане с подогретой водой. Принцип окорки бревен во вращающемся барабане сохранился до настоящего времени.

Первые сульфатцеллюлозные заводы в России построили в 1910 г. в Понинках и Пензе, выпускали целлюлозу из соломы.

Если раньше для получения волокон использовали в древесине только внутреннюю часть коры — луб, который составляет лишь ~ 40% от общей толщины коры, то в производстве лубяных волокон использовали в качестве сырья только ~ 4% от объема древесного ствола. К концу XIX в. сформировались технические идеи химической делигнификации древесины по кислотному и щелочному способу варки. Они открыли значительный по объему и дешевый источник целлюлозы, поскольку древесина в стволе взрослых деревьев занимает 85–95% его объема, и весь этот объем древесного ствола может идти на переработку в волокно! Так началась эра производства технической целлюлозы и появилась целлюлозно-бумажная промышленность.

А. Л. Лавуазье справедливо утверждал, что «индустрия — это жизнь цивилизованного государства. Нельзя рассчитывать на успех индустрии, если не совершенствовать непрерывно математические, физические и химические науки... Все части наук и ремесел связаны. Это одна армия, имеющая один фронт». В производстве технической целлюлозы из древесного сырья потребовалось оборудование для производства щепы, варки и отбелки целлюлозы, регенерации химикатов, а также различные химические реагенты (щелочь, кислоты, хлор, гипохлорит натрия), контрольная, измерительная аппаратура, методы анализа поступающих сред и готовой целлюлозы. В технологических процессах используются избыточное давление и агрессивные среды. Новое, наукоемкое производство впитало в себя результаты исследований и опытно-конструкторских работ XVIII–XIX вв. в областях неорганической и органической химии, химии древесины, технологии производства целлюлозы, химической технологии процессов и аппаратов. В этой связи можно упомянуть работу Л. П. Жеребова «Химическая сторона сульфит-целлюлозного производства» (1894), в которой впервые был научно представлен анализ технологических процессов и намечены пути их усовершенствования.

Можно ли было организовать производство целлюлозы из древесины ранее конца XIX в.? Отметим, что для получения лубяных волокон, ранее применявшихся в производстве бумаги, в качестве щелочи использовалась только древесная зола, которую также использовали в производстве стекла, для отбеливания, стирки и чистки тканей. Другого промышленного способа получения щелочи в таких масштабах не существовало. Д. А. Заварицким в 1856 г. была подробно описана техника и технология производства карбоната калия (поташа) из древесины, которая состояла из четырех последовательных операций: приготовление золы, выщелачивание золы, выпаривание зольного щелока, прокаливание сырого поташа. По данным автора, из 8 м³ древесины различных пород можно получить 2–8 кг поташа, когда для варки 1 т целлюлозы необходимо 350 кг поташа в единицах NaOH.

Современная наука берет свое начало с 1620-х гг. Одна из первых академий наук в мире, Парижская Академия наук, в 1775 г. объявила премию за изобретение процесса,

в котором хлорид натрия, в изобилии встречающийся в природе, можно было бы превращать в соду, чтобы использовать ее для производства стекла и мыла взамен древесной золы. Французский химик-технолог и инженер Николя Леблан разработал промышленный способ получения чистого карбоната натрия из поваренной соли. При действии серной кислоты на поваренную соль он получил сульфат натрия (глауберову соль), который далее прокаливал в пламенной печи вместе с углем и известняком. В результате получился плав, из которого водой извлекали карбонат натрия. В 1791 г. по методу Н. Леблана под Парижем был построен первый завод по производству карбоната натрия производительностью 250–300 кг/сут. Современники восторженно отмечали, что «открытие искусственной соды есть одно из наиболее значительных благодеяний, если не самое значительное, среди тех, которые новая наука дала человечеству». И это не является преувеличением заслуг Леблана. Получение соды из минеральных источников открыло промышленное производство значительно более дешевого, а, следовательно, и широкодоступного мыла, заменившего поташ и древесную золу, а также послужило сохранению от варварского истребления лесов и толчком к развитию стекольной промышленности. Однако через 150 лет технология, разработанная Н. Лебланом, была востребована для регенерации щелочи в производстве целлюлозы по сульфатному методу варки и успешно применяется до настоящего времени.

Только значительно позднее возникло производство аммиачной соды. В 1865 г. Эрнест Сольве построил небольшой завод в местечке Куйе (Бельгия), на котором хлорид натрия растворял в аммиачной воде. Полученная сода была более дешевой и стала основой для производства мыла и моющих средств. Но настоящим прорывом в производстве щелочи и хлора стала первая в мире установка электролиза, запущенная в эксплуатацию в 1890 г., которая ежедневно производила 1,5 т каустической соды и 2,5 т хлора. Так, благодаря результатам научных исследований во всех областях знаний начиналось становление промышленного производства химических реагентов, необходимых целлюлозной промышленности. Результаты фундаментальных и прикладных научных исследований XIX в. во всех областях науки и техники стали фундаментом быстрого развития ЦБП и из мелкустарного производства бумаги появилась крупная отрасль промышленности.

В начале XX в., через 100 лет после изобретения бумагоделательной машины, ее ширина достигла 4 м, скорость — 140 м/мин, а производительность — 20 т бумаги в сутки. В 1908 г. создан многодвигательный электрический привод бумагоделательной машины, заменивший громоздкий групповой привод с ременной передачей. В прессовой части машины гауч-пресс заменен отсасывающим валом. Началась специализация машин для производства определенных сортов бумаги и картона. За первые двадцать лет XX века ширина машины увеличилась до 6 м, скорость — до 300 м/мин, а производительность — до 100 т/сут.

К 1925 г. доля сульфатной целлюлозы в мировом производстве волокнистых полуфабрикатов составила 25%. А начиная с 1930-х гг. производство целлюлозы по сульфатному способу варки в США уже начинает доминировать над сульфитным способом, поскольку щелочным методом можно перерабатывать все древесные породы, тогда как запасы ели и пихты — древесного сырья для сульфитного способа — иссякали. Росту производства сульфатной целлюлозы также способствовал резкий скачок спроса на оберточные виды бумаги и упаковку. Нужно отметить, что к началу 1900-х годов сульфитный и сульфатный способ варки работали без регенерации химикатов, и потери химических реагентов восполняли свежими химикатами. Только в 1933 г. был установлен первый регенерационный котел для сжигания сульфатных щелоков производительностью 120 т абсолютно сухих веществ в сутки, изобретенный Г. Х. Томлинсоном, который открыл эру экономичной и энергоэффективной сульфатной варки целлюлозы.

Удельный вес сульфитной целлюлозы в общем объеме выпуска целлюлозы в разных странах в 1950-х гг. представлен в табл. 14.3.

Таблица 14.3. Уровень производства сульфитной целлюлозы в различных странах в начале 1950-х гг.

Страна	Производство, млн т		Удельный вес сульфитной целлюлозы в общем объеме выпуска, %
	всех видов целлюлозы	в том числе сульфитной	
США	12,8	2,15	17
Канада	3,36	2,15	64
Швеция	2,36	1,37	58
Финляндия	1,16	0,82	70
Япония	0,75	0,55	73
Западная Германия	0,50	0,50	100
Норвегия	0,50	0,41	82

В Западной Германии все 100% объема производства целлюлозы получены по сульфитному способу. Напомним, что сульфатный способ варки был изобретен в Германии в 1882 г., и практически сразу он был запрещен на законодательном уровне. Этот запрет связан с образованием дурнопахнущих соединений серы в процессе варки (первый сульфатцеллюлозный завод появился только 2004 г.). В начале 1960-х гг., с ростом объемов производства, на предприятиях ЦБП появились компьютерные системы управления на основе больших ЭВМ того времени: первая система управления бумагоделательной машиной — на заводе Potlach Forests, Inc. (США, штат Айдахо) в 1961 г., первая система управления варочным котлом — на заводе Gulf States Paper (США, штат Алабама) в 1962 г., в Европе — на заводе Enso-Gutzeit Oy's Kaukoräjä (Финляндия) в 1963 г.

В 1960-е гг. общей практикой сульфитных заводов был сброс отработанных варочных щелоков в прилегающие водные бассейны. В эти годы небольшие заводы в Северной Америке и Европе работали с достаточно высокой прибылью, которая позволяла использовать свежие химикаты на варку и закупать необходимую электрическую и тепловую энергию. Известно, что отработанный сульфитный варочный щелок является токсичным для водных микроорганизмов и вызывает очень высокое биохимическое потребление кислорода, попадая в водоем. Поэтому к концу 1960-х гг. стало очевидным, что в самое ближайшее время общественность запретит прямой сброс отработанных щелоков. Сульфитным предприятиям, помимо экологических проблем, ощутимый удар в начале 1970-х гг. нанес мировой энергетический кризис, который резко увеличил стоимость энергии. Сульфитные заводы впервые столкнулись с проблемой закрытия производства или увеличением его объема для установки систем регенерации химикатов (это существенные капитальные затраты и дополнительные производственные расходы), которые дают производству часть необходимой энергии от сжигания органических веществ щелока и прекращают сброс щелоков в водные бассейны. Скандинавские заводы первыми стали сжигать щелока для получения энергии.

Еще одной проблемой сульфитного способа является переработка малосмолистых древесных пород — ели и пихты, поскольку при кислотном процессе смолистые вещества не растворяются и вызывают так называемые «смоляные затруднения», тогда как сульфатный способ варки в щелочной среде лишен данного недостатка и перерабатывает любые древесные породы. Помимо ограничений породного состава древесины, используемого на варку сульфитным способом, у нее хуже бумагообразующие свойства, чем у сульфатной, волокна которой относительно меньше укорачиваются при размоле и дают более сомкнутый и менее прозрачный лист. Кроме того, продолжительность сульфитной варки на 2–3 часа больше, чем у сульфатной. Следовательно, оборот варочного котла при периодической сульфитной

варке больше, и соответственно, суточная и годовая производительность с 1 м³ объема котла в два раза ниже, чем у сульфатной периодической варки, и совершенно не сравнима с непрерывным способом. Этот показатель исключительно важен, поскольку производство целлюлозы капиталоемкое и более высокая производственная мощность имеет короче срок окупаемости проекта.

С целью повышения конкурентоспособности сульфитного способа был разработан и внедрен способ непрерывной варки, в частности, на заводе в Манхайме (Германия), который работает и в настоящее время. Были предложены ступенчатые способы варки на натриевом основании, которые позволяют перерабатывать практически любые породы древесины, включая древесину лиственницы. Несмотря на очевидные экономические преимущества, ступенчатые варки из-за трудности регенерации химикатов отработанных щелоков на натриевом основании проиграли бисульфитному способу на магниевом основании, при котором эффективно решается регенерация химикатов, обеспечивая его экологические преимущества. Однако имеющиеся недостатки сульфитного способа варки показали, что он неконкурентоспособен на рынке целлюлозы для производства бумаги (не удовлетворяет по качеству продукции и экономической эффективности производства) и его применение целесообразно только в сегменте производства специальных видов целлюлозы, включающих целлюлозу для химической переработки.

В 1970-е гг. резко увеличилась стоимость производства целлюлозы, выросли капитальные затраты на строительство целлюлозных заводов, а также требования к охране окружающей среды. Особенно это коснулось сульфитной целлюлозы, что способствовало сокращению ее производства и быстрому внедрению нового способа производства волокнистого полуфабриката — термомеханической массы (ТММ), взамен сульфитной целлюлозы в композиции бумаги. Высокие механические свойства ТММ позволили частично или полностью заменить целлюлозу в композиции некоторых массовых видов бумаги. По сравнению с другими видами древесной массы ТММ содержит большее количество длинных волокон благодаря размягчению щепы в процессе ее предварительной пропарки. Этот технологический элемент повышает физико-механические свойства полуфабриката, что увеличивает прочность бумажного полотна во влажном состоянии, повышает безобрывность работы БДМ и печатных станков. Кроме того, производство ТММ характеризуется незначительными выбросами в окружающую среду и низкими, в 4–6 раз меньшими удельными капитальными затратами: 50 тыс. долларов на 1 т ТММ вместо 200–300 тыс. долларов/т суточной мощности целлюлозного завода (цены 1975 г.). Это обеспечило исключительно быстрое распространение производства ТММ. Если в 1968 г. имелась одна промышленная установка мощностью 30 тыс./год, то в конце 1970-х гг. во всем мире работали 89 установок, которые производили 6 млн т ТММ: 55 установок получали массу для газетной бумаги, 20 — для различных видов печатной бумаги (журнальной, офсетной, основы для мелования, бумаги для справочников и т. п.), четыре — для санитарно-бытовых видов бумаги, и только шесть установок производили товарную ТММ. В качестве сырья для производства ТММ используют хвойные породы древесины: ель, сосну, гемлок, бальзамическую и дугласову пихту, отходы лесопиления. ТММ из лиственных пород древесины используют для производства картона, журнальной, писчей, печатной, газетной бумаги и пушонки.

Первая промышленная установка ХТММ по производству 375 т/сут и выходом массы 90–92%, поставленная фирмой «Дефибратор», начала работать в 1978 г. в Канаде на заводе «Ко Канадиан Интернэшнл Пейпер», г. Гатино, провинция Квебек. Удельный расход энергии на производство ХТММ составляет 1340 кВт·ч/т. Использование ХМММ в сочетании с ДДМ в производстве газетной бумаги сократило в композиции содержание полубеленой сульфатной целлюлозы с 17 до 6%.

Начиная с 1970-х гг. быстро развивается техника электронной коммуникации, и высказывались опасения, что она полностью вытеснит бумагу. Однако спрос на бумагу, и особенно

на «деловую» (конторскую) бумагу и бумагу для деловой переписки, значительно увеличивается с изменением ее ассортимента. В качестве примера новых образцов спроса в 1980-е гг. можно отметить рулонную бумагу для распечаток с компьютеров, бумагу для печати на конторских репрографических аппаратах, копийную бумагу — огромный рынок бумаг, которого еще в 1960-е гг. не было. До 2000 г. темпы среднегодового прироста спроса на бумагу и картон устойчиво сохраняются на уровне 2,3%.

«Деловую» бумагу достаточно условно подразделяют на канцелярскую / формулярную, копийную / множительную бумагу и безугольную бумагу для машинных копий. В 1986 г. общий рынок этих видов бумаг в Западной Европе — 3,2 млн т, в США — 4,1 млн т (исключая безугольные бумаги). Потребление безугольной копийной бумаги в Западной Европе составляет 560 тыс. т, в США — 670 тыс. т. Однако в связи с переходом на новые способы репродуцирования, использование электронных систем для оплаты счетов и широким распространением персональных компьютеров темпы прироста данного вида продукции в 1990-е гг. снижаются в два раза по сравнению с 1980-ми гг.

В конце 1980-х гг. в странах с развитой ЦБП, таких как США, Канада, Швеция, Финляндия, Австрия и Япония, работало 355 сульфитцеллюлозных заводов. Об угасании производства сульфитной целлюлозы свидетельствует тот факт, что на период 1990–1993 гг. расширение производства сульфитной целлюлозы намечалось только в Европе и всего на 15 тыс. т/год, в то время как производство сульфатной целлюлозы в мире должно увеличиться на 9 млн т.

В эти годы растет мировое потребление газетной бумаги, и если в 1986 г. оно составило 29,3 млн т, то в 1991 г. — около 34 млн т. Нужно отметить, что в 1970-е гг. подавляющее большинство новых машин газетной бумаги устанавливалась в Скандинавских странах, тогда как в 1980-е гг. 60% новых мощностей по производству газетной бумаги, или 1,65 млн т от общего количества 2,7 млн т, введены в эксплуатацию в странах континентальной Европы и Великобритании. Одной из причин, определяющей такое размещение производства, является рост использования макулатуры в композиции газетной бумаги.

В Северной Америке в 1989 г. кислую сульфитную варку применяют на 34 заводах общей производительностью 9000 т/сут. На 18 предприятиях средняя производительность одного предприятия 100 тыс. т/год. Более крупные сульфитцеллюлозные предприятия входят в состав ЦБК. Объем производства сульфитной целлюлозы относительно общего выпуска целлюлозы в разных странах и СССР приведены в табл. 14.4.

Таблица 14.4. Объем производства сульфитной целлюлозы в различных странах в 1989 г.

Страна	Производство, сульфитной целлюлозы, млн т	Удельный вес сульфитной целлюлозы в общем объеме выпуска, %
США	1,4	3
Канада	1,6	13
Швеция	0,75	12,5
Финляндия	0,15	3
Западная Германия	0,654	100
СССР	2,1	31

В ФРГ в 1989 г. сульфитную целлюлозу вырабатывают на восьми заводах, из них шесть применяют магниевое основание. При использовании других оснований: натриевого, аммониевого, кальциевого — в большинстве случаев отработанные щелока сжигают, улавливают и повторно используют диоксид серы и производят пар. Таким образом, к началу 1990-х гг.

появились предприятия, которые на этот период времени можно считать эталоном рационального применения сульфитного способа варки целлюлозы. Сульфитную варку совершенствуют и проводят периодическим и непрерывным способом. В связи с ужесточением требований по снижению выбросов в водоемы и атмосферу, особенно в странах Центральной Европы, в 1990-е гг. некоторые предприятия перешли на продленную делигнификацию (варка целлюлозы до более низких чисел Каппа), что снижает расход хлора на отбелку сульфатной и сульфитной целлюлозы, или полностью отказываются от его применения, внедряют более совершенное оборудование для промывки целлюлозы с повышением степени отбора щелоков до 98–99%. (Однако позднее от продленной делигнификации в варочном котле отказались, поскольку требуется дополнительный расход древесного сырья, и на ее замену пришла двухступенчатая кислородная делигнификация, которая исключила этот недостаток.) Такие предприятия имеют значительное преимущество перед другими производителями по удельным затратам на выпуск продукции, уровню выбросов и сбросов производственных загрязнений в окружающую среду.

К 1990 г. самый большой сектор производства «деловой бумаги» представляет копия / множительная бумага. В Западной Европе ее произведено 1,5 млн т, в США — 1,9 млн т. Почти вся бумага не содержит древесной массы. Хороший рост 5% в год обусловлен использованием копировальных устройств и персональных компьютеров.

С ростом производства и потребления бумаги появляется «макулатура» — сырье для получения вторичного волокна. Еще в 1800 г. англичанин Мэтью Коупс первым в Англии на практике переработал бумажные отходы, но промышленная переработка и облагораживание макулатуры для производства типографской и офсетной бумаги из макулатурного сырья появились только в начале XX столетия в США. Главной причиной начала промышленной переработки макулатуры в этой стране стал значительный рост производства и потребления бумаги на душу населения. В начале XX в. среднедушевое потребление в США составило 34 кг, в Германии — 24 кг, в России — 3 кг. Через 90 лет, в 1991 г., душевое потребление бумаги и картона в развитых странах увеличилось почти в 10 раз! Так, в США оно составило 311 кг, в Швеции и Западной Германии — по 230 кг, в Японии — 121 кг, в Италии — 110 кг, в Мексике и России — по 34 кг, в Пакистане — 3 кг, в Уганде — 0,4 кг. Основным побудительным мотивом переработки макулатуры стало использование доступного и более дешевого источника волокна, которое обеспечивало снижение затрат на производство бумажно-картонной продукции.

На рис. 14.6 представлено увеличение годовой мощности в мире одного технологического потока по производству сульфатной целлюлозы начиная с 1933 по 2017 г., которая выросла в 78 раз. Такой головокружительный рост производительности делает надежность одним из основных требований к системам управления технологическими процессами (АСУ ТП). Требуется не только автоматическое управление конечным элементом АСУ ТП — регулирующими клапанами, которых насчитываются тысячи единиц, но и автоматический мониторинг технического состояния и работоспособности оборудования. Легко представить, если крупнейшая в мире БДМ в Швеции (Stora Enso Kvarnsveden), имеющая ширину сетки 11,3 м, среднюю скорость 1850 м/мин, общую длину здания почти 300 м и производительность 430 000 т/год, вдруг остановится из-за неисправности на один час, то какие астрономические потери это принесет производству. Сегодня важнейшим инструментом при принятии решения руководством и персоналом являются приложения (средства) обработки информации, которая накапливается системами АСУ ТП. Поэтому она постоянно совершенствуется, чтобы системно повышать прибыльность производства. Еще одной из основных предпосылок успешного производства является анализ и обширное использование информации по качеству целлюлозы и бумаги. Все ключевые показатели качества вырабатываемой целлюлозы и бумаги измеряются датчиками или анализаторами непосредственно в потоке. Лабораторные анализы вручную проводят только для контроля датчиков и приборов.

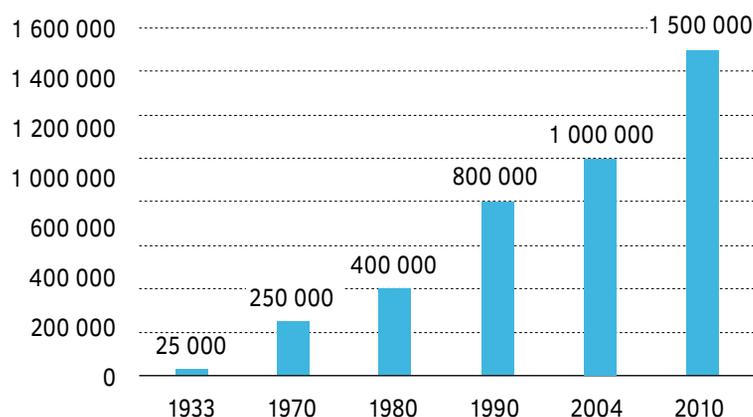


Рис. 14.6. Мощность по варке сульфатной целлюлозы одним технологическим потоком, т/год

Германия является ведущим производителем бумаги в Европе. Однако с производством целлюлозы ситуация выглядит иначе. Начиная с 1950-х гг. в Германии не было построено ни одного целлюлозного завода. В 2003 г. на пяти сульфитцеллюлозных заводах Германии производили 850 000 т целлюлозы при годовой потребности внутреннего рынка примерно 4,5–5 млн т. И вот в 2004 г. запущен первый сульфатцеллюлозный завод в Германии – Zellstoff Stendal GmbH, с производственной мощностью 550 000 т белой целлюлозы. Инвестиции составили 1 млрд евро, срок окупаемости завода 15 лет при жизненном периоде предприятия 30–40 лет. Нужно отметить, что в Германии установлены очень жесткие экологические стандарты на эмиссию вредных выбросов. Однако, по мнению немецких специалистов, технологический прогресс и постоянное ужесточение экологических норм по истечении 30–40 лет потребуют инвестиции в модернизацию оборудования, которые могут достичь уровня, превышающего уровень затрат на строительство нового предприятия.

В 2010 г. общее производство сульфитной целлюлозы в мире сократилось, но для повышения его экономической эффективности увеличивается объем варочных котлов и суточная производительность варочного цеха сульфитной целлюлозы (табл. 14.5).

Таблица 14.5. Изменение суточного производства сульфитной и сульфатной целлюлозы в XX в. и в начале XXI в. на передовых предприятиях

	1900 г.	1930 г.	1950 г.	1980 г.	2010 г.
Объем сульфитных варочных котлов, м ³	50–180	50–180	70–280	70–340	160–400
Суточная производительность варочного цеха:					
– сульфитный, т/сут	15	50	300	500	600
– сульфатный т/сут	–	70	500	1200	7000

Мировое производство сульфитной целлюлозы от общего производства волокон в 2000-х гг. составляет всего 4%, из которого производство сульфитной целлюлозы для химической переработки занимает одну треть. Таким образом, сульфитное производство в XX в. проиграло конкурентную борьбу на рынке целлюлозы для массовых видов бумаг, но осталось в важном сегменте целлюлозы для специальных видов бумаги и для химической переработки в производстве более высоковязких (хлопкоподобных) видов продукции.

С появлением в 1989 г. интернета как глобальной информационной системы эпоха бумаги, как носителя информации, начинает затухать и начинается эпоха электронных носителей информации. В 1993 г. испанская ежедневная газета «EI Mundo» одной из первых открыла

сайт в интернете, который в дальнейшем стал самой популярной онлайн-газетой во всем испаноязычном мире. По данным компании, сайт стал очень прибыльным начиная с 2003 г. Не случайно известные в мире журналы «ТАРРИ» с 2012 г. и «Nesweek» с 2013 г. сменили бумажный формат на электронный. Нет сомнения, что данная тенденция сохранится, поскольку выросло новое поколение людей, которое предпочитает получать и использовать информацию в электронном виде. И на это не может не реагировать рынок бумаги. Так, в сегменте газетной бумаги с докризисного 2007 г. мировое производство устойчиво снижается и за четыре года сократилось на 6,9 млн т до 33,1 млн т, а в сегменте писчепечатных бумаг — на 8,7 млн т до 111 млн т (данные RISI). По прогнозу, к 2030 г. потребность в писчепечатных видах бумаг уменьшится на 17,4 млн т. Однако при этом необходимо учитывать постоянное увеличение населения Земли, и если в 2017 г. оно составило 7,5 млрд, то к 2030 г. может достигнуть 10 млрд человек. Поэтому по данным RISI к 2030 г., ожидается рост продукции ЦБП с 440 до 570 млн т, или на 30%!

Производство бумаги в России

В Древней Руси основным материалом для письма до появления бумаги были береста, а также деревянные дощечки (церы), покрытые воском, использовали и очень дорогой пергамент. Более двух с половиной столетий русские торговые люди покупали бумагу за границей — в Китае, Персии, Средней Азии и Европе. Зачинателями бумажного дела в нашей стране стали богемец Мартин Зауер и наш соотечественник Федор Савинов. Полагают, что в селе Копнино на реке Уче водяные колеса бумажной мельницы вертелись с 1550 г., но мельница уничтожена пожаром. Имеются свидетельства собственного производства бумаги — документы на так называемой грозненской бумаге. Уникальные бумажные листы, выпущенные в России не позднее 1565 г., хранятся в музеях. Россия внесла свой вклад в усовершенствование технологий производства бумаги, в ряде случаев опережая своих западных конкурентов. В середине XVII в. русские изобретатели, работавшие на бумажной мельнице московского Печатного двора на реке Пахре, впервые в Европе применили металлическую оковку пестов и железную ступу. За границей оковку пестов толчеи железом предложил француз Понти только в 1746 г. Первая русская печатная газета «Ведомости» вышла в 1703 г. На смену ручной толчее пришли жернова, приводимые в движение приводом от водяного колеса, поэтому мануфактуры стали называть бумажными мельницами. В 1714 г. Петром I основана в Красном Селе под Петербургом бумажная мельница — одна из старейших в России (в 2003 г. закрыта), на которой впервые было выработано много новых для того времени видов бумаги. В первые годы существования мануфактура выпускала около 5000 стоп бумаги в год (приблизительно 40 т) и приносила прибыль около 25 тыс. рублей. Хорошо сохранился лист бумаги, выработанной на Красносельской мельнице, с собственноручной надписью Петра I: «Сия бумага делана здесь на мельнице и можно ее сделать сколько надобно в государстве и тако не токмо во Францию подряжать». В 1707–1714 гг. на Богородицкой и Красносельской мануфактурах были проведены первые опыты использования соломы для производства бумаги, а с середины XVIII в. в России было налажено производство из соломы низких сортов бумаги. В начале XVIII в. большое значение имело внедрение для размол тряпья нового размалывающего аппарата — ролла, который заменил малопродуктивную толчею. В 1718 г. русскими бумажниками были также созданы оригинальные роллы, представляющие собой деревянные ящики со сплошной крышкой. Размол производился ножами, закрепленными на вращающемся барабане (руле), и пачкой неподвижных ножей, установленных под барабаном (плашкой). Коллегия Адмиралтейства в 1719 г. опубликовала указ о продающихся сортах бумаги, в котором приводился перечень различных сортов бумаги: от больших листов для рисования до аптечной бумаги и даже картузной для боевых зарядов. Для производства бумаги необходимо было сырье, поэтому в 1720 г. вышел указ Петра I, согласно которому в армии и морском флоте производился

сбор изношенных парусов, несмоленных канатов, веревок, разного тряпья, а люди, у которых были ненужные полотняные вещи, могли по собственному желанию за денежное вознаграждение отдавать их в полицмейстерскую канцелярию. Позднее был введен налог, который крестьяне платили тряпьем. Для развития производства российской бумаги в 1721 г. Петр I обязал употреблять в делопроизводстве российскую бумагу и повысил пошлину на импортную бумагу. Его преобразования требовали широкой издательской деятельности. В первой четверти XVIII в. в стране выпустили больше книг, чем за два предыдущих столетия (600 научных изданий и учебников).

Русские мастера совершенствовали разные стороны процесса изготовления бумаги. Так, был предложен способ отбелики бумажной массы на морозе — отбеливание озоном, а также использовали новые виды сырья. Асбестовая бумага была изготовлена в 1710 г., а бумага из водорослей — в 1760 г. К середине XVIII в. существовало 20 бумажных предприятий, которые выпускали бумагу не всегда надлежащего качества. Поэтому в 1744 г. Мануфактур-коллегией была создана комиссия для проверки качества российской бумаги. Убыточные мануфактуры были закрыты, а также был произведен расчет годового объема бумаги, в котором нуждалась Россия. В 1778 г. Сенат издал указ о клеймении бумаги. К концу XVIII в. в России насчитывалось более 60 бумажных фабрик, расположенных в 24 губерниях, где выдвигали бумагу методом ручного черпания, и по оснащению не уступавших европейским. Существовали три вида мануфактур: государственные, купеческие, а также помещичьи, которые помещики открывали в своих имениях. До отмены крепостного права в 1861 г. они оставались наиболее массовыми. Многие работали круглые сутки и суммарно производили свыше 700 тыс. стоп разной бумаги в год (приблизительно 5000 т). Для получения бумаги использовали отходы текстильного и канатного производства, солому, осоку, камыш, водоросли и т. д. Наиболее крупные фабрики находились в Москве, Петербурге, Калуге и Ярославле. Заложенная в 1786 г. была под Калугой Троицкая бумажная фабрика производила более 12000 стоп бумаги в год (приблизительно 90 т). Фабрика была оснащена каменными хранилищами, где складировалось вторсырье для переработки, готовая бумага, а также располагались черпальня и паккамера. Импорт бумажной продукции в конце XVIII в. сократился вдвое, а с начала XIX в. Российская империя начинает экспортировать бумагу в Среднюю Азию, Персию, Китай.

Первая треть XIX в. — время расцвета тряпичной бумаги. Из пуда тряпья получалась стопа хорошей книжной бумаги (480 листов). Цена такой меры достигала двух рублей. Император Александр I (1801–1825) ослабил цензуру, разрешил открытие частных типографий, что способствовало книгоизданию и росту выработки бумажной продукции. В 1801–1805 гг. в России напечатали 1304 книги на русском и 641 книгу на иностранном языке. Но в целом государственная политика в области бумагоделательного производства отставала. Несмотря на преимущество механизированного способа, до 1890-х гг. в России существовали предприятия с ручным отливом бумаги и картона. Причины — отсутствие собственного бумагоделательного машиностроения, дешевизна крепостного труда и низкий, по сравнению с европейским, спрос на продукцию. В начале XIX в. среднестатистический объем потребления бумаги в Англии составлял 1,54 кг, в России — 0,13 кг и к началу XX в. через сто лет: в Англии — 27 кг, а в России — 2,4 кг.

В 1816 г. архангельский купец 3-й гильдии Иван Яковлевич Демидов в деревне Мечке и на речке того же названия (25 верст от Архангельска) построил бумажную фабрику. Производство занимало площадь в 1 десятину 730 квадратных сажени (около 1,5 га). Все строения — деревянные, одноэтажные, «в длину на 12, а поперек на 4,5 сажени», в которых размещались рольня, черпальня, клеильня, два амбара и три флигеля. Амбары использовались для сушки бумаги и «складки». В перечне производственных мощностей фабрики Демидова указано: «Число роллей — 4, котлов для варения сандалу и клею — 3, чанов для выпуска материи и черпания бумаги — 4, винтов выматывать бумагу — 2». Сырьем для производства бумаги служило тряпье, которое собиралось в Архангельске и его окрестностях.

Клей для бумаги готовили из обрезков кожи и оленьих рогов. Для окраски бумаги в синий цвет применяли сандал, который закупали за границей. Для отбеливания массы применялись квасцы.

Процесс изготовления бумаги начинали с сортировки тряпья — сортировали по роду материала, цвету, изношенности и т. д. Одновременно его «рушили» — разрезали по швам, отпарывая крючки и пуговицы. Разобранное тряпье трясли на столах с решетчатым дном, удаляя пыль и грязь. После сухой очистки тряпье передавалось в поварню, где его закладывали в большие металлические котлы и варили с золой и известью для удаления грязи и жира. Далее вываренное тряпье загружали в ролл — деревянный ящик, внутри которого вращались два барабана, один из которых был усажен ножами для рубки тряпья, а второй — с сеткой, через которую оттеживалась грязная вода. Промытое и предварительно измельченное тряпье вынималось из ролла, повторно варилось в котлах с известью и, уже окончательно очищенное, закладывалось в другие роллы с более острыми ножами, где размалывалось на волокна, превращаясь в бумажную массу. При последнем размоле, если хотели получить цветную бумагу, добавляли краску, например, для получения синей (сахарной) бумаги добавляли сандал. Подготовленная бумажная масса сливалась в деревянные чаны, из которых она черпалась формой. Черпальщик брал форму обеими руками, опускал ребром в чан, а зачерпнув определенное количество массы, вынимал форму, сотрясал, распределяя массу по всей сетке, и передавал валяльщикам. Валяльщик, дав окончательно стечь воде, клал на образовавшийся слой бумаги кусок сукна и, опрокинув форму, вываливал сукно вместе с приставшей к нему бумагой на другой кусок сукна. Когда набиралось определенное количество сырых листов — кладка (до 180), их забирал выметчик и относил под пресс. Отжатые листы бумаги становились настолько прочными, что их можно было снимать с сукна. Листы бумаги относились мальчиками в сушильню — большое помещение, где их развешивали на веревках для просушки. Просушенная бумага связывалась в пучки и проклеивалась. Для проклейки бумагу опускали в раствор клея, сваренный из костей, и оставляли в этом растворе до тех пор, пока пропитаются все листы. После проклейки их разбирали и относили в сушильню. Далее листы сортировались, сгибались пополам, складывались в дести, стопы и запрессовывались. Перед прессованием продукция высших сортов обрезалась, а иногда золотилась по краям. Окончательно приготовленная бумага упаковывалась в бумажные «сорочки» с фабричным ярлыком и в таком виде поступала в продажу.

При ручном производстве единицей учета бумаги служила стопа, содержащая 480 листов. Дробной единицей стоп служила десьт бумаги из 24 листов. В среднем за один рабочий день, продолжавшийся 10–12 часов, на одном черпальном чане получалось 10–12 стоп. На фабрике Демидова трудился один мастер, четыре подмастерья, 12 рабочих. Выработывалась бумага писчая (трех сортов № 1–3), сахарная синяя и белая, оберточная и чайная. Из отчета о работе фабрик и заводов Архангельской губернии за 1824 г. известно, что фабрика Демидова выработала писчей бумаги № 1 (самого высшего сорта) — 100 стоп, № 2 — 150 стоп, № 3 — 1200, бумаги сахарной белой — 150, синей — 150, оберточной — 100, чайной — 50. Годовое производство фабрики в 1824 г. составило более 13 т бумаги, а выработка на одного работника — 0,8 т. Большая часть доходов от продажи бумаги тратилась Демидовым на содержание фабрики. После смерти Ивана Яковлевича Демидова и его сына, наследника, череда событий привела к тому, что фабрика попала в государственную казну и стала сдаваться в аренду на 15 лет. Уже в 1850 г. в особых сведениях арендатор фабрики Брант указал: «На фабрике в Мечке особых машин не имеется, выработка бумаги производится посредством устроенного в оной механизма, приводящегося в действие водою». При фабрике работал один мастер — русский подданный — и от 15 до 25 чернорабочих вольнонаемных. Поскольку в 1865 г. желающих взять в аренду фабрику в Мечке уже не нашлось, и она принадлежала государству, то с согласия государя Александра II она была выставлена на продажу «со

всеми строениями без земли, в полном составе или по частям, за возможно выгодную для казны цену». И в 1871 г. фабрика была разобрана «без остатка». Так завершилась история ручного отлива бумаги в Архангельской губернии.

Но помимо ручного отлива бумаги в стране начиналось ее машинное производство. Так, в 1816 г. в Петергофе появилась бумажная фабрика, на которой установили бумагоделательную машину по патенту Фурдринье. Строительством руководил англичанин Вестингаузен — представитель фирмы Донкина. В Экспедиции изготовления государственных ценных бумаг (будущий Гознак) в 1818 г. был разработан и применен способ получения высокохудожественных водяных знаков путем выштамповывания их на сетке. В Англии подобное изобретение запатентовали лишь через восемь лет. На Петергофской бумажной фабрике в 1835 г. была изобретена бумагорезательная машина, разрезающая ролевою бумагу на листы любого формата. И наконец, нельзя не упомянуть изобретение А. Варгунина, благодаря которому в 1843 г. появилась машина для непрерывной проклейки и сушки ролевой бумаги. Выпуск бумагоделательного оборудования частично наладили на Александровском пушечном, Ижорском и других литейных заводах. Если в 1850 г. на 50 фабриках России применялись бумагоделательные машины, то в 1885 г. их количество возросло до 135.

В последнее десятилетие XIX в. русским специалистам принадлежит приоритет в открытии электролитической отбелки целлюлозы (С. Степанов, 1890 г.) и изготовлении асбестового огнестойкого картона — уралита (А. М. Имшенецкий, 1895 г.), высоко оцененного Д. И. Менделеевым и получившего его широкое распространение в России и за рубежом.

Мощный импульс российская бумажная промышленность получила с упразднением крепостного права. Реформа 1861 г. отменила бесплатную рабочую силу, и дела на мелких фабриках пошли на убыль, тогда как представители крупного капитала строили большие предприятия. Так, первый в России целлюлозный завод по натронному методу варки из древесины был построен в 1875 г. в селе Кошели Боровичского уезда Новгородской губернии, но вскоре закрылся из-за нерентабельности производства (отсутствовала регенерация щелочи). Однако позднее на Дитятковской, Красносельской и Добрушской бумажных фабриках в конце 80-х гг. XIX в. вырабатывали натронную целлюлозу, но из соломы. В 1883 г. появились Окуловский и Кувшиновский заводы, а в 1899 г. — Сокольский ЦБК, на котором установили шесть варочных клепаных котлов и первую бумагоделательную машину, которая выработала 600 пудов бумаги, или порядка 10 т. В 1900 г. в России (без Финляндии) действовало уже 12 сульфитцеллюлозных предприятий, на которых было установлено 58 варочных котлов общей емкостью 4660 м³ и было произведено 30 тыс. т сульфитной целлюлозы, или 88% общего выпуска целлюлозы в стране, который с учетом соломенной и натронной целлюлозы составил 34 тыс. т. Известно, что на одном из заводов было установлено 14 котлов объемом по 180 м³, остальные 44 варочных котла, установленные в стране, в среднем небольшие, по 50 м³ каждый.

Нужно отметить, что если в 1861 г. выработали 35 тыс. т бумаги, то в 1900 г. выработка российской бумаги увеличилась в пять раз и составила 177,4 тыс. т, для ее производства использовали 34 тыс. т отечественной целлюлозы и 19 тыс. т произведенной древесной массы.

В конце XIX в. потребности жизни общества обусловили разнообразие сортов бумаги, которых насчитывалось более полусотни. Однако в целом объемы производства бумаги за рубежом в XIX в. превышали объем производства в России: в Англии — в четыре, а во Франции — в двенадцать раз. В 1913 г. объем выпуска бумаги составил 197 тыс. т, целлюлозы — 41 тыс. т и картона — 29 тыс. т. Увеличение объемов производства бумаги требовало сырья, и в России в апреле 1913 г. под руководством финских инженеров начато строительство первенца отечественной целлюлозно-бумажной промышленности — Новолялинского целлюлозно-бумажного комбината. Строительство бумажной фабрики и древесно-массного производства продолжалось немногим более года, и в июне 1914 г. начался выпуск оберточной бумаги из дефибрерной древесной массы (ДДМ). Несмотря на производство древесной

массы и целлюлозы, тряпье в российском бумажном производстве использовали до 30-х гг. XX столетия.

В июле 1914 г. началась Первая мировая война, и в результате военных действий прекратили работу Перновский, Влоцлавский, Рижский и Слокский сульфитные заводы, а оставшиеся сократили производство в 1,5 раза. В Петергофе в 1916 г. запустили первую бумагоделательную машину, которую изготовили на Петербургском литейном заводе. Пятого августа 1917 г. — первая варка сульфитной целлюлозы на Сухонском ЦБК (в 2006 г. после ряда переименований предприятию вернули историческое название Сухонский ЦБК, которое сохранилось до настоящего времени). В 1917 г. в стране имелось всего шесть действующих сульфитных заводов производительностью 50 тыс. т. На промышленной площадке Новолялинского ЦБК планировалось строительство первого в России сульфатцеллюлозного завода. Оборудование для завода было куплено в Финляндии незадолго до 1917 г. Варочные котлы были вращающиеся, промывка целлюлозы производилась в диффузорах мощностью до 10 т/сут.

После Октябрьской революции почти треть целлюлозных предприятий оказалась вне пределов РСФСР. В 1921 г. осталось всего 137 фабрик. Численность занятых сократилась с 56 до 21 тыс. человек. Выпуск продукции упал почти в 10 раз.

Выпуск целлюлозы из древесины по сульфатному способу варки начался на Новолялинском ЦБК только в 1922 г. Это был первенец сульфатцеллюлозного производства в СССР — об этом написано в первом номере отраслевого журнала «Бумажная промышленность» за 1922 г. Проект Котласского лесохимического и целлюлозно-бумажного комбината закончен в 1928 г., и он предусматривал выпуск 60 тыс. т бумаги из своих полуфабрикатов и 9 тыс. т блененой целлюлозы для отпуска «на сторону». Выработка на одного работающего в год при численности производственного персонала 1700 человек составила 53 т продукции. Из-за отсутствия средств, начала Великой Отечественной войны и по ряду других причин начатое строительство законсервировано до начала 1950-х гг.

В 1922 г. на Сухонском ЦБК проводится первая реконструкция и впервые в стране освоена выработка блененой растворимой целлюлозы, столь необходимой для нужд военных предприятий. В это же время на предприятии строится первый в стране завод «Дубитель» по производству экстракта из отработанных щелоков.

После окончания Гражданской войны в короткий срок восстановлены сульфитные заводы, и довоенный уровень производства бумаги 190 тыс. т был достигнут в 1924/1925 гг. В 1926 г. фирмой «Наскман & К» (Финляндия) в поселке Советский (бывший Йоханнес) заложен первый камень в строительстве Выборгского сульфитцеллюлозного завода производительностью 60 т/сут, а уже на следующий год, в 1927 г., завод (ныне ООО «Выборгская ЛК») выработал первую продукцию сульфитную неблененую целлюлозу. Стране не хватало целлюлозы для производства бумаги, но в 1927 г. в городах Мытищи, Ленинград, Могилев и Клин уже строятся заводы по получению вискозных волокон, для производства которых нужна своя целлюлоза для химической переработки — вискозная. Поэтому целенаправленно возводятся специализированные предприятия по производству вискозной, кордной, ацетатной целлюлозы, для производства эфиров целлюлозы (например, карбоксиметилцеллюлозы (NaКМЦ)), что получило общее название «целлюлоза для химической переработки». Для оценки масштаба проделанной в стране работе можно уточнить, что в 1980-е гг. страна выпускает 700 тыс. т целлюлозы для химической переработки и занимает второе место в мире после США.

В период индустриализации страны построены крупные сульфитцеллюлозные заводы — в 1928 г. Сясьский (ныне ОАО «Сясьский ЦБК») и Балахнинский (ныне АО «Волга»). В 1928 г. объем выпуска бумаги составил 284 тыс. т, целлюлозы — около 86 тыс. т и картона — 47 тыс. т. В 1929 г. запущен Кондопожский (ныне АО «Кондопожский ЦБК»), в составе варочного цеха установлены три футерованных варочных котла по 130 м³ каждый,

и в 1931 г. — Вишерский ЦБК (закрыт в 2007 г.), что позволило уже через четыре года, в 1928/1929 гг., увеличить выпуск сульфитной целлюлозы на 112 тыс. т, или более чем в два раза. Нужно отметить, что на период строительства Сясьский ЦБК по своей производственной мощности 100 т целлюлозы в сутки был одним из крупнейших заводов в Европе. В 1932 г. в стране выработали 525 тыс. т бумаги. В этом году ленинградским заводом бумагоделательного оборудования имени 2-й пятилетки выпущена первая в Советском Союзе бумагоделательная машина шириной 2520 мм, которая установлена на Камском комбинате. В дальнейшем отечественные машиностроительные заводы освоили выпуск машин шириной 4200 мм и другого самого разнообразного бумагоделательного оборудования.

Интенсивное развитие сульфатного метода началось в 1930-е гг., было построено много предприятий. Так, в 1935 г. запущена первая очередь сульфатцеллюлозного Солонбальского завода в г. Архангельске, в 1938 г. сдан в эксплуатацию Марийский ЦБК, в 1939 г. — один из крупнейших в Европе, Сегежский ЦБК. В 1936 г. пущен в работу Камский ЦБК (ныне ЦБК «КАМА»); 28 августа 1940 г. Архангельский ЦБК (ныне АО «Архангельский ЦБК») получил первую сульфитную целлюлозу. В варочном цехе установлены три котла периодической варки целлюлозы немецкой фирмы «Бернингауз» емкостью по 280 м³ с проектной мощностью 72 тыс. т сульфитной целлюлозы в год. В 1940 г. объем выпуска бумаги составил 812 тыс. т, целлюлозы — 529 тыс. т и картона — 151 тыс. т. В марте 1941 г. завершено строительство Соликамского целлюлозно-бумажного комбината (ныне АО «Соликамскбумпром») и была получена первая продукция — сульфитная целлюлоза и оберточная бумага. Однако необходимо отметить предприятия, которые были известны ограниченному кругу лиц. Началась эта история в 1937 г., когда один из инженеров центрального института бумажной промышленности, Георгий Михайлович Орлов, обратился с письмом к И. В. Сталину, в котором писал, что в случае войны хлопок будет нужен для обмундирования и производить порох из хлопка — ненужная роскошь. Он предложил построить для производства пороха заводы специальной пороховой древесной целлюлозы в виде жгутика, получаемой сульфитной варкой из хвойных пород древесины. В конце 1940 — начале 1941 г. появились пять номерных целлюлозных заводов: в Архангельской области три завода — завод № 1 в поселке Пуксоозеро, завод № 2 в поселке Кодино, завод № 5 в поселке Волошка; в Кировской области в поселке Созимский завод № 4 и в Свердловской области в г. Туринске завод № 3.

Помимо развития производственных мощностей сульфитной целлюлозы, начиная с 1930-х гг. на крупных предприятиях стали строить цехи по переработке сульфитных щелоков для получения спирта, дрожжей, дубителей, лигносульфонатов. В предвоенные годы была создана собственная полуфабрикатная база и импорт сульфитной целлюлозы был прекращен. В 1941 г. в СССР произведено 500 тыс. т целлюлозы. Уже во время Великой Отечественной войны опыт создания номерных предприятий пригодился, и осенью 1942 г. на Архангельском комбинате открылся засекреченный цех, в котором производили целлюлозу для изготовления порохов (цех просуществовал до 1990-х гг.). Такую же сульфитную целлюлозу для порохов производил и Соликамский ЦБК. В июле 1942 г. Архангельский ЦБК дал первую продукцию — технический спирт, необходимый для получения синтетического каучука, а в 1943 г. были получены первые кормовые дрожжи. В этом же году Архангельский ЦБК впервые вышел на международный рынок: «Экспортлес» поставлены первые 416,8 т сульфитной целлюлозы, выработанной в труднейший для предприятия военный год. В 1945 г. на Архангельском ЦБК начат выпуск белой целлюлозы и в 1946–1947 гг. эта продукция поставлялась на экспорт. В 1945 г. объем выпуска бумаги в стране составил 321 тыс. т, целлюлозы — 276 тыс. т и картона — 56 тыс. т.

После Великой Отечественной войны в короткие сроки было восстановлено производство сульфитной целлюлозы, в том числе на территории Калининградской области, вошедшей в состав СССР. Так, в 1946 г. возобновили работу Калининградский ЦБК-1

(ранее принадлежал немецкой фирме «Фельдмюллер»), Калининградский ЦБК-2 (бывший Кенигсбергский ЦБК), Советский ЦБЗ (бывший Тильзитский ЦБК) и Неманский ЦБК (ранее принадлежал немецкой группе «Walldorf»). К середине 1947 г. был восстановлен национализированный после войны завод компании Walldorf Ab, получивший название Приозерский целлюлозный завод (ЦЗ). В 1947 г. состоялся пуск первой очереди завода, изготовившего первые тонны высококачественной вискозной целлюлозы. Приозерский ЦЗ по проекту был построен без очистных сооружений и производственные стоки сбрасывались в реку Вуоксу. В 1948 г. на Архангельском ЦБК начат выпуск вискозной целлюлозы. В период с 1940 по 1950 г. доля СССР в мировом выпуске целлюлозно-бумажной продукции оценивалась всего в 0,8–1,5%.

После войны, в 1951 г., завод «Энсо» переименован в Светогорский ЦБК (с 2009 г. — ЗАО «Интернешнл Пейпер»), который выпускал вискозную целлюлозу. Благодаря восстановлению отечественных и новых предприятий, оказавшихся на территории СССР, уже во втором послевоенном — 1947 г. уровень довоенного производства был превзойден, а в 1950 г. довоенный уровень производства был превышен и производство бумаги в стране составило 1193 тыс. т, целлюлозы — 1100 тыс. т и картона — 292 тыс. т.

В 1952 г. на Сясьском ЦБК заработал первый в стране цех по получению ванилина из лигносульфонатов. По проекту жидкие лигносульфонаты должны были поступать со всех сульфитных предприятий Северо-Западного региона страны. Такой подход обеспечивал комплексное использование древесного сырья, и, что очень важно, снижалось количество загрязнений, сбрасываемых в водоемы, поскольку из производственных стоков отбирались наиболее загрязняющие компоненты в виде товарных продуктов, и только оставшаяся часть в виде загрязнений сбрасывалась в водные бассейны. Так, степень загрязненности сточных вод по БПК₅ при наличии производства спирта и дрожжей снижается на 45–50% по сравнению с исходными щелоками. В 1955 г. в стране произведено 1741,5 тыс. т целлюлозы, 1847,8 тыс. т бумаги и 559,8 тыс. т картона. В 1959 г. вступил в строй Пермский целлюлозно-бумажный комбинат, вырабатывающий древесную массу. В этом году в СССР выходило 10 603 наименования газет с разовым тиражом 62,3 млн экземпляров и 908 наименований журналов с годовым тиражом 515 млн экземпляров.

В 1960 г., впервые в истории человечества, советским ученым удалось сфотографировать обратную сторону Луны, и это оказалось возможным благодаря специальной электрохимической бумаге, созданной отечественными специалистами во ВНИИБ (г. Ленинград). В этом году весь объем выпуска бумаги составил 2334 тыс. т, целлюлозы — 2282 тыс. т и картона — 893 тыс. т. В стране строятся новые крупные сульфитцеллюлозные предприятия и модернизируются существующие. Так, 10 октября 1961 г. Котласский ЦБК (ныне «Филиал АО «Группа «Илим»» в г. Коряжме») вступил в строй действующих предприятий ЦБП по выпуску вискозной целлюлозы с проектной производительностью по варке 152 тыс. т/год и товарной вискозной целлюлозы — 110 тыс. т. Завод состоит из двух технологических потоков. Варочный цех оборудован десятью варочными котлами шведской фирмы «КМВ». Котлы биметаллические, емкостью по 320 м³. В сушильном цехе установлено два пресспата (сушильные машины) производительностью по 150 т/сут; обрезная ширина полотна 4200 мм, рабочая скорость 37–210 м/мин. Выпускаемая продукция — целлюлоза для химической переработки, обладающая большой химической чистотой и рядом особых физико-химических свойств, — предназначена для производства вискозной текстильной нити (штапеля, шелка, корда), пленок, пластмасс, натрий-КМЦ, а также бумаги фильтровальной, изделий бытового и санитарно-гигиенического назначения.

Судьбоносным стало постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР «О мерах по ликвидации отставания целлюлозно-бумажной промышленности» (7 апреля 1960 г.), которое определило перспективу развития ЦБП в стране. Так, в 1964 г. построен один из крупнейших лесопромышленных комплексов — Братский ЛПК (первая очередь — 125 тыс. т кордной

целлюлозы), в 1966 г. — Байкальский ЦБК (100 тыс. т кордной целлюлозы холодного облагораживания и 100 тыс. т вискозной целлюлозы), а в 1969 г. — Сыктывкарский ЛПК. Среди всех предприятий ЦБП, вновь создаваемых в Сибири и на Дальнем Востоке, Братский ЛПК выделялся не только масштабами, но и разнородностью по профилю объединяемых предприятий, в частности в организации производства целлюлозы для выработки кордного волокна. Его первый технологический поток по выпуску 125 тыс. тонн небеленой целлюлозы в год был сдан в эксплуатацию 31 декабря 1965 г. В 1967 г. на двух технологических потоках целлюлозного производства № 1 освоен выпуск кордной целлюлозы. Также в этот год на первой очереди комбината была выпущена следующая продукция: сульфатная беленая целлюлоза, тарный картон, талловая канифоль, кормовые белковые дрожжи, скипидар, жирные кислоты.

В 1965 г. на Пермском ЦБК были построены вторые в стране на предприятиях ЦБП очистные сооружения по очистке сточных вод. Амурский целлюлозно-картонный комбинат (ЦКК) пущен в 1967 г. для производства 100 тыс. т вискозной целлюлозы. На заводе смонтирован первый отечественный реактор для проведения кислородно-щелочной делигнификации, который так и не был запущен в постоянную эксплуатацию. Помимо строительства новых предприятий в «чистом поле» проходило строительство новых производств на уже действующих промышленных площадках. Так, на Кондопожском ЦБК в варочном цехе к существующим трем футерованным котлам по 130 м³ дополнительно введены четыре биметаллических варочных котла по 160 м³, а затем еще шесть таких же биметаллических котлов. На Котласском ЦБК в 1965 г. на второй очереди комбината запущено производство нейтрально-сульфитной полуцеллюлозы в составе двух технологических потоков проектной производительности 117 тыс. т/год. Варка технологической щепы из лиственных пород древесины производилась на двух установках непрерывной варки типа «Пандия» японской фирмы «Хитачи-Зосен». Также запущено производство сульфатной целлюлозы. В составе варочного цеха два технологических потока. Проектная мощность первого, вырабатывающего целлюлозу для мешочной бумаги, составляла 430 т/сут, выход целлюлозы — 50%. Проектная мощность второго потока (целлюлоза для картона и бумаги для гофрирования) составляет 450 т/сут, выход целлюлозы — 55%. Варка производится в двух установках непрерывной варки типа «Камюр».

В 1967 г. на Архангельском ЦБК внедрена биологическая очистка стоков. Интенсификация очистки на внеплощадочных сооружениях достигается за счет принудительной подачи воздуха, питательных солей, культивирования активного ила, состоящего из различного рода микроорганизмов. Микроорганизмы активного ила пожирают органические вещества, содержащиеся в стоках, окисляют их до углекислого газа и воды, и их вредность по БПК снижается на 94–96%. Сточные воды после очистки, поступая в реку, потребляют кислород уже только на окисление остаточных загрязнений, содержащихся в них. В 1968 г. на Архангельском ЦБК введена в строй вторая очередь комбината — завод сульфатной целлюлозы для производства картона мощностью 318 тыс. т/год по варке и цех по производству из нее на двух картоноделательных машинах (КДМ) тарного картона — крафтлайнера и флютинга. С запуском этого производства Архангельский ЦБК стал крупнейшим многопрофильным предприятием страны, не имеющим себе равных по мощности в Европе. Впервые началось столь масштабное производство тарного картона.

До начала 1970-х гг. на варку целлюлозы использовалась исключительно древесина хвойных пород, и лиственная древесина только подмешивалась к хвойному сырью, что ухудшало качество вырабатываемых целлюлозных полуфабрикатов. С другой стороны, наличие значительных запасов лиственных пород древесины требовало рационального их использования. Для достижения поставленной цели были построены производства сульфатной беленой целлюлозы из лиственных пород в смеси березы и осины: в 1972 г. на третьей очереди Котласского ЦБК, в 1975 г. на третьей очереди Архангельского ЦБК,

а в 1985 г. — на второй очереди Светогорского ЦБК (с 2009 г. — ЗАО «Интернешнл Пейпер»). На Братском ЛПК с 1971 по 1975 г. были введены дополнительные мощности, позволявшие комплексно перерабатывать листовую древесину: были приняты в эксплуатацию заводы сульфатной вискозной и сульфатной беленой целлюлозы, канифольно-экстракционный, лесопильно-деревообрабатывающий, древесноволокнистых плит и фанерный. Общая мощность заводов комбината по варке целлюлозы была доведена до 1 млн т/год. Однако качественную вискозную целлюлозу на варочной установке непрерывного действия, которая была смонтирована на втором целлюлозном производстве, получить не удалось из-за явления «карамелизации» сит варочного котла. Растворенные на стадии предгидролиза в кислой среде полисахариды древесины при переходе на стадию щелочной варки выпадали в осадок на ситах варочной зоны, препятствуя отбору щелока из котла. В связи с этим в начале 80-х гг. было организовано производство беленой целлюлозы для бумаг.

Так, в 1975 г. на Архангельском ЦБК пущена в эксплуатацию третья очередь комбината — завод беленой сульфатной целлюлозы из хвойных пород древесины мощностью 285 тыс. т по варке. В строй вошло по существу целое новое предприятие, по техническому уровню соответствующее лучшим мировым достижениям того времени: варочные и промывные установки шведской фирмы «КМВ». Производительность варочной установки «Камюр» — 285 тыс. т/год. Однако три года работы показали недостаток хвойного сырья и возникла необходимость перехода на переработку лиственной древесины. Уже через полгода коллектив завода не просто выпускал беленую листовую целлюлозу марки ЛБ-0, но и стал производить продукцию высшей категории качества.

Некоторые производители целлюлозы в СССР располагались вне лесных регионов и должны были работать на юге страны на камышовом сырье (в Астрахани, Кзыл-Орде, Измаиле). В декабре 1962 г. Астраханский ЦКК (в 1995 г. предприятие остановлено) вступил в строй с проектной мощностью по варке полуцеллюлозы — 73 тыс. т/год. Однако из-за неграмотной заготовки камыша, стебли которого не срезали, а с корнем выдергивали, сырьевая база камыша была загублена и пришлось доставлять древесное сырье из сибирского региона. Это отразилось на судьбе предприятия в 1995 г., когда оно было остановлено из-за роста транспортных тарифов на древесное сырье. Часть производственных мощностей комбината ныне использует ООО «Астраханская фабрика тары и упаковки».

В 1972 г. началась реконструкция Светогорского ЦБК, и по завершении реконструкции он стал на самом современном оборудовании выпускать ацетатную и вискозную целлюлозу, лучшую в стране и востребованную в мире. По проекту сульфитные щелока на натриевом основании должны сжигаться вместе с сульфатными — так называемая перекрестная регенерация химикатов. В этом же году на Красноярском ЦБК внедрено сжигание отработанного сульфитного щелока на магниевом основании с регенерацией химикатов, в 1982 г. — на Светлогорском ЦБЗ (ныне ОАО «Светлогорский ЦБК, Республика Беларусь»). К сожалению, на обоих заводах возникли сложности с отечественным магниерегенерационным котлоагрегатом (МРК) 300 т а. с. в./сут, и технология регенерации не была доведена до логического конца по ряду проектных и конструктивных причин.

В 1975 г. объем выпуска бумаги составил 5215 тыс. т, целлюлозы — 6815 тыс. т и картона — 3368 тыс. т. В 1980 г. построен последний «в чистом поле» комбинат — Усть-Илимский ЛПК. На Сыктывкарском, Братском и Усть-Илимском комбинатах был сделан упор на комплексную переработку древесины: механическую с выпуском пиломатериалов, фанеры, и химическую с производством целлюлозно-картонной продукции, продуктов лесохимии. На этих комбинатах монтировались установки гидролизно-дрожжевого производства. На Братском ЛПК планировалась переработка предгидролизатов от производства вискозной и кордной целлюлозы (предгидролиз — технологическая операция с целью удаления из щепы гемицеллюлоз методом кислотного гидролиза и с последующей варкой щепы по

сульфатному способу). В СССР в 1980 г. объем выпуска бумаги составил 5288 тыс. т, целлюлозы 7123 тыс. т и картона 3445 тыс. т.

Еще в 1970-е гг. с ростом в стране объемов производства и потребления продукции ЦБП был объявлен всесоюзный сбор макулатуры. Инициатива принадлежала Георгию Михайловичу Орлову — председателю Государственного комитета Совета Министров СССР по лесной, целлюлозно-бумажной, деревообрабатывающей промышленности и лесному хозяйству, заместителю председателя Госснаба СССР. К середине 70-х гг. на складах Госснаба СССР накопилось уже более полумиллиона тонн макулатуры, требовавшей дальнейшей переработки, и Г. М. Орлов предложил открыть пять предприятий по переработке макулатуры в Ленинграде, Набережных Челнах, Киеве, Алексине, которые и стали строить в 1980-е гг.

Для снижения сброса загрязнений промышленного стока в 1981 г. на Кондопожском ЦБК пущена в работу вакуум-выпарная установка фирмы «Розенлев», предназначенная для упаривания сульфитных щелоков с получением жидких товарных лигносульфонатов технических (ЛСТ). Начиная с 1986 г. ступенчатая сульфитная варка на натриевом основании внедрена на Соликамском, Томаринском и Чеховском ЦБК. Из-за отсутствия очистных сооружений в 1986 г. закрыто производство вискозной целлюлозы на Приозерском ЦЗ, и завод перефилировали на производство мебели. В 1987 г. на предприятиях РСФСР был достигнут максимальный выпуск целлюлозы, который составил свыше 8,8 млн т (3-е место в мире после США и Канады), а максимальный объем производства бумаги — 5334 тыс. т и картона — 3244 тыс. т достигнут в 1988 г. (4-е место в мире после США, Канады и Японии). Сравнение ЦБП СССР с другими ведущими странами представлено в табл. 14.6.

В 1988 г. закрылся Ляскельский ЦБЗ (Республика Карелия), производивший бумагу из древесной массы. В этом же году на Камском ЦБК (в настоящее время ЦБК «Кама») построен новый цех по производству ТММ. Его проектная мощность — 50 тыс. т/год ТММ, отбелка которой производится перекисью водорода. Оборудование поставлено фирмой «Мицубиси» (Япония), а в 1990 г. производство древесной массы уже составило 90 тыс. т. В 1988 г. завершена модернизация Выборгского ЦБК, и он стал самым современным предприятием по производству сульфитной целлюлозы в стране с производственной мощностью 63 тыс. т. На Архангельском ЦБК на производстве сульфитной целлюлозы началась коренная реконструкция и в первую очередь осуществлен перевод варочных котлов с выдувки на вымывку целлюлозы.

В СССР в 1989 г. сульфитная целлюлоза производится на 34 заводах. В 1991 г. общее производство целлюлозы в Российской Федерации составило 10 млн т, из которых 2,3 млн т — сульфитная целлюлоза (23%), или 24,7% от общемирового производства сульфитной целлюлозы. В России такую целлюлозу выпускают 30 заводов, из них 14 производят более 150 тыс. т/год, тогда как остальные 16 предприятий находятся значительно ниже оптимальной мощности, в среднем 12,5 тыс. т/год. Мировая практика показала, что для утилизации сульфитных щелоков необходимо магнелиевое основание варочных щелоков с установками по их сжиганию и регенерации химикатов, благодаря чему бисульфитный способ варки становится практически экологически чистым. В 1989 г. подписан контракт с австрийской фирмой «Фест Альпине» и финскими «Сунд» и «Альтрем» на их участие в реконструкции сульфитного производства на Архангельском ЦБК. Однако наступил распад СССР и переход к рыночной экономике привел к резкому сокращению объема производства продукции отрасли и краху всех планов технического перевооружения.

Доля РСФСР в общем объеме производства продукции ЦБП в СССР была всегда определяющей, и в 1988 г. на предприятиях, расположенных на территории РСФСР, объем производства целлюлозы составил 95,4%, бумаги — 84,37%, картона — 72,2% от производства этой продукции в СССР. В табл. 14.7–14.10 представлена структура и характеристика основных фондов ЦБП в СССР и Российской Федерации.

Таблица 14.6. Некоторые показатели целлюлозно-бумажного производства в ведущих странах мира в 1988 г.

Страна	Население, млн чел.	Количество предприятий		Мощность предприятий, тыс. т/год		Потребление бумаги и картона на душу населения, кг/год	Производство продукции, тыс. т/год	
		бумажных и картонных фабрик	заводов по производству волокнистых полуфабрикатов	бумажных и картонных фабрик	заводов по производству волокнистых полуфабрикатов		бумаги и картона	волокнистых полуфабрикатов
США	245,4	548	217	72862	56860	317	69477	55530
Канада	26,1	109	36	17028	25021	236,4	16638	23679
Япония	122,4	489	60	27143	13176	204,5	24624	10415
ФРГ	60,7	174	35	11397	2414	203,7	10576	2358
Швеция	8,3	55	55	8630	10870	242	8161	10307
Финляндия	4,9	46	47	9095	9545	204	8653	9001
Франция	55,8	146	21	6550	2475	142,2	6313	2190
Великобритания	56,8	92	7	4676	466	163,5	4295	421
СССР	283,7	173	54	11494	11000	35,3	10750	10065
В мире	5110,4	4185	1160	245126	172361	43,8	226329	160551

Примечание: в 1988 г. в СССР достигнута максимальная выработка бумаги и картона.

Таблица 14.7. Структура основных фондов по производству целлюлозы и полуцеллюлозы в СССР, Российской Федерации и других республиках в 1990 г.

	Варочные котлы				
	Всего	Периодические		Непрерывные	
		сульfitные	сульфатные	Камюр	Пандия
СССР	370	210	117	25	18
Российская Федерация	345	196	110	25	14
Другие республики	25	14	7	–	4

Таблица 14.8. Структура основных фондов по производству бумаги и картона в 1990 г.

Наименование оборудования	СССР	Российская Федерация	Доля РФ от общего числа машин, %
Всего машин, из них:	547	407	74
– бумагоделательные машины	382	286	75
– картоноделательные машины	107	72	67
– сушильные машины	58	49	84

Таблица 14.9. Характеристики мощности заводов по производству сульфатной и сульфитной целлюлозы в Российской Федерации в 1991 г.

Мощность завода	Число заводов	Доля от общего числа заводов, %	Объем производства продукции по проекту, тыс. т	Доля от общего объема продукции, %
Сульфатные заводы				
До 50 тыс. т	3	13	112,9	2
До 100 тыс. т	2	9	187,6	3
До 200 тыс. т	5	22	691,0	12
До 300 тыс. т	6	26	1602,0	28
Свыше 300 тыс. т	7	30	3198,7	55
Всего по сульфатным заводам	23	100	5792,2	100
Сульфитные заводы				
До 35 тыс. т	7	24	255,1	8
До 65 тыс. т	8	28	344,5	12
До 150 тыс. т	9	31	1253,1	40
Свыше 200 тыс. т	5	17	1259,5	41
Всего по сульфитным заводам	29	100	3112,2	100

Таблица 14.10. Распределение парка бумаго- и картоноделательных машин СССР по скоростям (1990 г.)

Группы машин по скоростям, м/мин	Количество бумагоделательных машин, шт.	Количество картоноделательных машин, шт.
До 100	169	73
От 101 до 300	165	27
От 301 до 500	20	7
От 501 до 800	24	–
От 801 до 1000	4	–
Всего	382	107

В 1990–1991 гг. произведено 9,2 млн т первичных волокнистых полуфабрикатов и выработано 7,2 млн т бумаги и картона, при выработке которых использовано около 1,8 млн т макулатуры и доля вторичного волокна составляет 25%. В период с 1992 по 1998 г. объемы производства продукции ЦБП России снизились более чем в два раза. Наибольшее сокращение производства бумаги произошло в 1994 г., когда по сравнению с уровнем 1987 г. объем выработки составил 42,2%. Наименьшее количество картона было произведено в 1996 г., по сравнению с уровнем 1987 г. объем производства составил лишь 29,2%.

Объем производства целлюлозы этого периода составлял 35–37% к уровню производства 1987 г. С 1999 г. наблюдается достаточно динамичный прирост объемов производства всех видов продукции ЦБП, и наибольший объем продукции был произведен в 2006–2008 гг. Однако по сравнению с уровнем производства целлюлозы в РСФСР в 1987 г. (8,8 млн т) объем производства не превышал по варке целлюлозы 68%, по бумаге — 78%. И только по производству картона уровень 1988 г. был превзойден более чем на 17%.

В России макулатура используется в производстве около 70 видов бумаги и картона. Основная часть макулатуры (до 75%) используется для производства туалетной бумаги и картона (коробочного, тарного, гофрокартона). До 20% макулатуры используется в производстве кровельных материалов. На территории России имеются 27 предприятий, использующих макулатуру для производства бумаги и картона, и 14 предприятий используют макулатуру в производстве кровельных материалов. Наиболее крупными потребителями макулатуры в России

являются: Санкт-Петербург КБК (до 18%), Набережно-Челнинский КБК (10,4%), Алексинская КФ (12%), Ступинская КФ (9,8%), Балахнинский ЦКК (5,5%), Суоярвская КФ (4,2%).

Экономический кризис 2008 г. негативно отразился на ЦБП. Наибольшее влияние кризиса сказалось на работе ЦБП в первой половине 2009 г., что привело к снижению объема производства за год по варке целлюлозы на 7,2%, по бумаге — на 1,3% и по картону — на 6,5%. В 2010–2011 гг. наблюдается рост объема производства продукции ЦБП. Однако наиболее ощутимый прирост производства целлюлозы достиг только в 2018 г., когда ее объем составил 8,6 млн т и практически приблизился к уровню 1987 г. (8,8 млн т), а производство бумаги — 5,3 млн т и картона — 3,2 млн т уже соответствует уровню 1987 г. Начиная с середины 1990-х гг. все предприятия, расположенные на о. Сахалин, выработав свой ресурс и не найдя средств на модернизацию, стали останавливать производство: Холмский ЦБЗ (построен в 1919 г., производство бумаги остановлено в 1993 г.), Макаровский ЦБЗ, Долинский ЦБЗ (основан в 20-е гг.), Чеховский ЦБЗ (построен в 1922 г., с 1996 г. предприятие было официально законсервировано), Поронайский ЦБЗ и Томаринский ЦБЗ, а также Южно-Сахалинский ЦБК, Углегорский ЦБЗ (ликвидирован в 2006 г.). Редким исключением в этом перечне остается Балахнинский ЦБК (ныне АО «Волга»), на котором в 1997 г. остановлена сульфитная варка, но взамен производства сульфитной целлюлозы построили производство ХТММ. В 2001 г. закрылся Калининградский ЦБК-1. Российская Федерация в 2002 г. произвела целлюлозы и бумаги на 50% меньше, чем произведено в СССР еще в 1988 г., соответственно 5,6 млн т целлюлозы и 5,9 млн т бумаги. В 2007 г. закрыли Вишерский ЦБЗ. В 2008 г. закрылось производство вискозной целлюлозы для химической переработки на Котласском ЦБК (ныне «Филиал АО «Группа Илим» в г. Коряжме»). В 2011 г. закрылся Калининградский ЦБК-2, а в 2012 г. остановлено производство на Красноярском ЦБК (последнее название — Енисейский ЦБК). В табл. 14.11 представлены предприятия по производству сульфитной и сульфатной целлюлозы для химической переработки, которые прекратили свою работу.

Таблица 14.11. Сульфитная и сульфатная целлюлоза для химической переработки и ее производители в СССР

Целлюлоза для химической переработки	Производитель, год окончания работы	Назначение
Сульфитная целлюлоза:		
– вискозная	Приозерский ЦЗ — 1986 г. Светогорский ЦБК — 1995 г. Котласский ЦБК — 2008 г. Амурский ЦКК — 1994 г.	Вискозное волокно, текстильная нить (шелк)
– для Na-КМЦ	Светогорский ЦБК — 1995 г.	Na-карбоксиметилцеллюлоза
– ацетатная	Светогорский ЦБК — 1995 г.	Ацетаты целлюлозы
Сульфатная предгидролизная:		
– холодного облагораживания	Байкальский ЦБК — 2013 г.	Техническая нить (корд)
– горячего облагораживания	Братский ЛПК — 2005 г.	Высокомодульные волокна
– вискозная целлюлоза	Байкальский ЦБК — 2013 г.	Вискозные волокна

В итоге закрытия предприятий по производству целлюлозы для химической переработки страна лишила свою химическую промышленность отечественного целлюлозного сырья для производства вискозного волокна, текстильной нити (шелк), Na-карбоксиметилцеллюлозы и ацетатов целлюлозы.

О судьбе Байкальского ЦБК. Комбинат прекратил свою работу 25 декабря 2013 г., а 28 декабря 2013 г. Президентом России Владимиром Путиным было подписано распоряжение о создании на территории закрывшегося комбината экспоцентра «Заповедники России». Безусловно, строить завод на озере Байкал, жемчужине Сибири, было нельзя. Но завод построили, и посмотрим, как он работал. Так, по данным, опубликованным в 1993 г. О. М. Кожовой и А. М. Беймом, которые *десятилетие* проводили планомерные исследования

и собирали информацию о вкладе Байкальского ЦБК в загрязнение озера Байкал, было установлено, что влияние ЦБК на озеро по разным ингредиентам составляло от сотых долей процента до 10% от общего их поступления, которое принято за 100% (например, в мае 1986 г. от комбината поступало минеральных веществ 10,7%, органических веществ — 4,8%, взвешенных веществ — 0,03%).

После закрытия Байкальского ЦБК экологическая обстановка на озере не могла улучшиться в силу очевидных причин: отсутствие очистных сооружений в поселках вокруг Байкала, отсутствие нормально работающих очистных сооружений в городах на реках, впадающих в Байкал, например на реке Селенге, в г. Улан-Удэ; трансграничный перенос выбросов с Иркутского и Братского алюминиевого завода и т. д., т. е. то, что и было написано еще в 1993 г. Таким образом, после закрытия Байкальского ЦБК и сокращения его загрязняющего воздействия на ~10% начал разрабатываться план предотвращения сброса оставшихся 90% загрязнений в озеро Байкал — с чего и надо было начинать. Нужно отметить, что еще в 1987 г. в СССР была предпринята попытка построить вместо Байкальского ЦБК завод-дублер на площадке Усть-Илимского ЛПК, но не хватило средств. С закрытием производства целлюлозы для химической переработки на Братском и Байкальском комбинатах страна лишилась наукоемких производств, причем Байкальский ЦБК входил в тройку предприятий в мире, которые были способны получать показатель альфа-целлюлозы (химической чистоты) более 97%.

Однако в мире есть другие примеры. В Австрии фирма «Ленцинг», расположенная вблизи курортного местечка, является одним из крупнейших в Европе производителей целлюлозы для химической переработки по сульфитному способу варки. Закрытие производств вискозной целлюлозы в РФ стимулировало фирму к 2010 г. производить 235 тыс. т вискозной целлюлозы, а когда-то на этом заводе производили всего 30 тыс. т. В качестве примера также можно привести завод в г. Умкомаас в Южно-Африканской Республике, принадлежащий фирме Sappi Saiccor, который производит 600 тыс. т вискозной целлюлозы! Значит, можно расширять производство и не вредить природе.

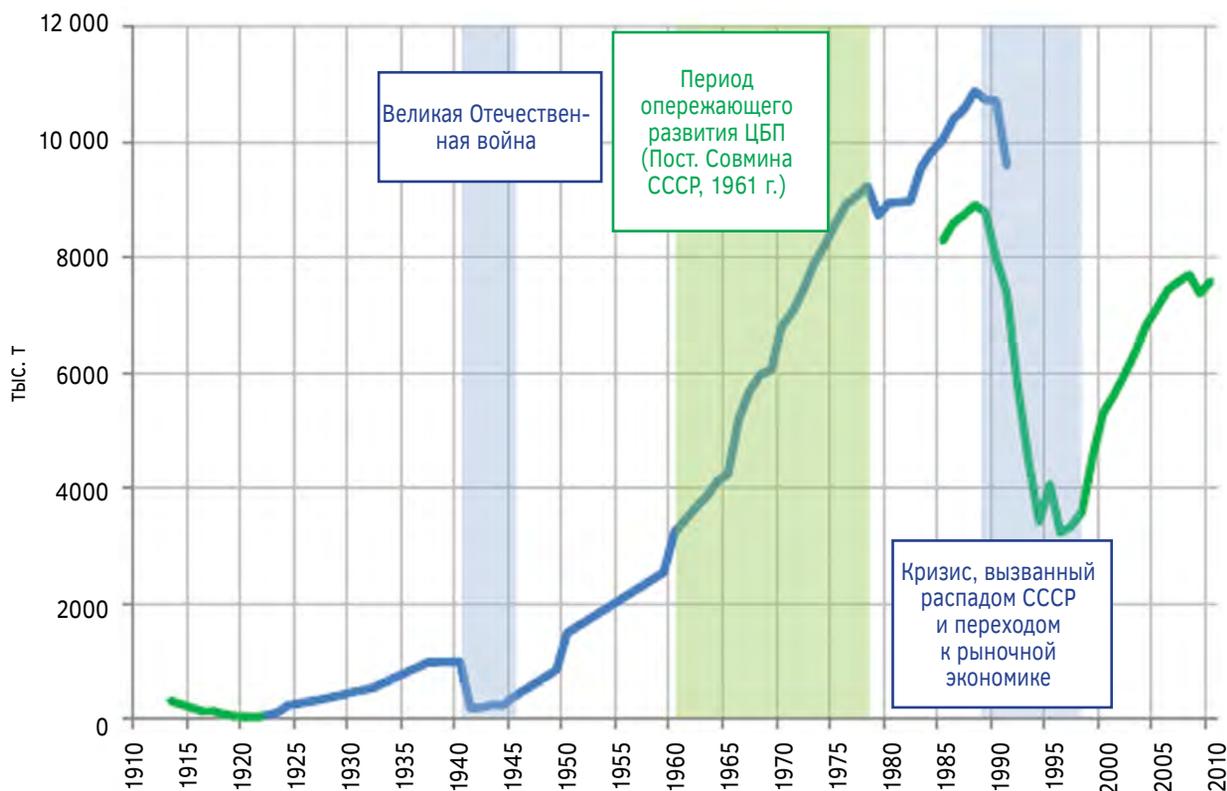


Рис. 14.7. Производство бумаги и картона в России и СССР в 1913–2011 гг. (РАО «Бумпром»)

Совершенствование методов отбелики целлюлозы

Отбелика растительных волокон появилась намного раньше, чем производство волокнистых полуфабрикатов из древесного сырья. Плиний Старший (23–79 гг. н. э.) в «Естественной истории» отметил, что еще древние галлы владели технологией отбелики растительных волокон за счет многократного чередования выдерживания их на солнечном свете и погружения волокна в раствор щелочи, получаемой из древесной золы. Окончательную обработку отбеливаемых волокон проводили молочной кислотой, полученной из кислого молока.

В начале XVIII в. этот метод уже достиг совершенства в Голландии и получил название «луговая отбелика». В основном льняные ткани, вытканые в Англии и других местах, привозились весной в Голландию, а осенью уже отбеленные льняные ткани отправляли обратно. В 1756 г. вышла первая книга по отбелике на солнце шерсти, льна, хлопчатобумажной пряжи (бумазеи). Ее автор, доктор Фрэнсис Хоум, представил описание всех технологических особенностей процессов, рецептов, качества химикатов, а также описал воздействие первых вспомогательных веществ, таких как кислоты, калий, известь и т. д. Им было предложено вместо кислого молока применять слабый раствор серной кислоты, что существенно сократило продолжительность этой операции. Продолжительность всей отбелики составляла несколько месяцев. Современная технология отбелики волокон, полученных из древесины, также использует чередование щелочных и кислотных ступеней и кислотную окончательную обработку в конце. Луговая отбелика была слишком дорогим процессом и поэтому для отбелики бумажной массы не применялась. Белизна бумаги зависела лишь от отсортировки белого тряпья. В 1774 г. шведский химик Карл Вильгельм Шееле открыл хлор и отметил сильное белящее воздействие газообразного хлора на растительное волокно. Это послужило основой для разработки новых и дешевых отбеливающих реагентов. Французский химик Бертолле обнаружил, что хлор при поглощении растворами или солями угольной кислоты создает растворы, обладающие отбеливающим действием, и для отбелики растительных волокон появилась торговая марка «Вода Жавелля». Французский химик Лабаракк заменил раствор поташа содой, и на рынке появилась торговая марка «Вода Лабаракка». К развитию производства белильных растворов причастны также французский химик Лавуазье и шотландец Джемс Уатт, изобретатель паровой машины. Впервые для отбелики тряпичной полумассы эти растворы применили Томас Генри из Манчестера (Англия) и Чептел во Франции. Продолжил линейку белильных растворов Чарльз Тиннантом из Шотландии, который, воздействуя газообразным хлором на известковое молоко, получил хлорную известь. В 1785–1786 гг. «Журнал де физик» опубликовал первый метод отбелики газообразным хлором, предложенный Луи Бертолле. Позднее, в 1805 г., для отбелики тканей стали использовать гипохлорит натрия и гипохлорит калия, и эра «луговой отбелики» закончилась. Только с появлением производства целлюлозы химическим способом — методом сульфитной и сульфатной варки, а также с появлением производства хлора и щелочи методом электролиза началась отбелика технической целлюлозы. Сначала отбелику проводили в одну ступень гипохлоритом (Г) в ролле в течение 10 часов, затем по схеме в три ступени X — Щ — Г, где X — хлорирование, Щ — щелочение, Г — гипохлорит, и, наконец, отбелику в четыре ступени X_н — Щ_в — Г_н — Г_в. Характерной особенностью последней схемы является не только чередование кислой и щелочных ступеней отбелики, но и чередование концентрации, используемой в отбелике целлюлозной массы: от низкой (Н) к высокой (В). При этом масса на первых трех ступенях отбеливалась непрерывно, а последняя ступень проводилась периодически для окончательной отбелики целлюлозы, если появлялась необходимость. Переход на комбинированные схемы отбелики связан с сокращением расхода отбеливающих химикатов и увеличением производительности отбельной установки. В табл. 14.12 представлено изменение технологии отбелики сульфитной целлюлозы на конкретном предприятии с 1925 г. до конца 1940-х гг. В табл. 14.13 представлено изменение базовых схем отбелики сульфитной целлюлозы для бумаги в промышленно развитых странах в 1960–1970-х гг.

Таблица 14.12. Изменение схемы отбелки и производительности отбельной установки сульфитной целлюлозы для бумаг с 1920-х до конца 1940-х гг. на примере одного из заводов в Канаде в г. Халле

Годы производства	1925 г.	1937 г.	Конец 1940-х гг.
Схема отбелки	Г	Х — Щ — Г	Х _н — Щ _в — Г _н — Г _в
Оборудование и технология отбелки	Ролл типа Вольфа — Флетчера	Периодическая отбелка на каждой ступени	Концентрация на ступенях: н — низкая концентрация; в — высокая концентрация
Производительность отбельного цеха, т/сут	15	50	120

Таблица 14.13. Изменение базовых схем отбелки сульфитной целлюлозы для производства бумаги в промышленно развитых странах в 1960–1970-е гг.

Годы производства	1960-е гг.	1970-е гг.
Вид отбелки	Отбелка с хлором	
Схема отбелки	Х — Щ — Г — Г — К	Х/Д — Щ — Г — Д — К

Примечание: принятые сокращения ступеней отбелки: Х — хлорирование; Щ — щелочение; Г — гипохлоритная; Д — двуокиси хлора; Х/Д — совместная обработка хлорированием и двуокисью хлора; К — кисловка.

Как видно из табл. 14.13, базовая схема отбелки сульфитной целлюлозы предполагает использование хлора, и после ступени щелочения (ступени делигнификации) следуют две ступени отбелки гипохлоритом. Однако эти реагенты имеют недостатки: появление смоляных частиц на поверхности целлюлозных волокон приводило к снижению производительности бумагоделательной машины (частицы смолы налипали на машинные валы и вызывали обрывы бумажного полотна — так называемые «смоляные затруднения»); товарная целлюлоза имеет низкую белизну и пониженные механические свойства. Поэтому для отбелки сульфитной целлюлозы в 1970-е гг. стали использовать значительно более дорогой реагент — диоксид хлора, который имеет в пять раз большую окислительную способность, чем хлор, что снизило «смоляные затруднения», повысило белизну товарной целлюлозы и ее механические свойства.

Помимо сульфитной целлюлозы для бумаги производили облагороженную целлюлозу для химической переработки (табл. 14.14). В прошлом задачей облагораживания являлось максимальное приближение исходной технической целлюлозы к хлопковому волокну, но с течением времени появился спрос на целлюлозы с особыми специфическими свойствами, не являющимися типичными для хлопкового волокна, поэтому данный вид целлюлозы получил название целлюлозы для химической переработки.

На этом этапе развития изменения в технологии отбелки сульфатной целлюлозы для бумаги были связаны с повышением качества товарной целлюлозы и снижением затрат на отбельные реагенты. Однако под давлением природоохранного законодательства, особенно в западноевропейских странах, в ЦБП стали активно искать пути сокращения сброса загрязнений в водоемы и выбросы в атмосферу. С точки зрения выбора стратегии отрасли большую роль сыграли работы отечественных ученых, в частности В. М. Василева, который в конце 1980-х гг. первым провел оценку токсичности фильтратов от обработки целлюлозы различными реагентами. Работа выполнялась путем отнесения массы каждого конкретного загрязняющего вещества к концентрации, соответствующей порогу токсического действия этого вещества (летальной концентрации ЛК₅₀). В результате был получен объем воды, который необходим для разбавления содержащихся в сбросе загрязняющих веществ до менее

опасного уровня. Проведенная оценка токсичности показала, что необходимо значительное разбавление фильтрата:

- от процесса хлорирования (Х) — в 116 раз;
- от последующего щелочения (Щ) — в 184 раза;
- от делигнификации пероксидом водорода (П) — в 9,4–85 раз;
- от кислородно-щелочной обработки (КЩО) — в 43–342 раза.

Таблица 14.14. Изменение схем облагораживания целлюлозы для химической переработки в 1950–1970-е гг.

Годы производства	1950-е гг.	1970-е гг.
Вид отбелки	Отбелка с хлором	
Схема отбелки	Отделение мелочи — Х — Щ — Г ₁ — ХО — Г ₂ — К	Отделение мелочи — Х — Щ — ГО — Г ₁ — Г ₂ — Д — К Отделение мелочи — Х/Д — Щ — ГО — Г ₁ — Г ₂ — Д — К
Производительность отбельного цеха, т/сут	300	300

Примечание: Отделение мелочи (мелкого волокна) проводят с целью частичного обессмоливания массы, поскольку на его поверхности сорбированы частички смолы. ХО — холодное облагораживание (мерсеризация) — обработка с расходом щелочи 200% к массе волокна, концентрация массы 5%, температура 15°С, продолжительность 60 мин; ГО — горячее облагораживание — обработка с расходом щелочи 10% к массе волокна, концентрация массы 10%, температура 120°С, продолжительность 180 мин; К — кисловка — окончательная обработка водным раствором SO₂ для стабилизации белизны целлюлозы.

Изменение базовых схем отбелки сульфатной целлюлозы для бумаги представлено в табл. 14.15.

Таблица 14.15. Изменение базовых схем отбелки сульфатной целлюлозы для производства бумаги в промышленно развитых странах в 1960–1970-е гг.

Годы производства	1930-е гг.	1940-е гг.	1960-е гг.	1970-е гг.
Вид отбелки	Отбелка с хлором			
Схема отбелки	Х — Щ — Г	Х — Щ — Г — Г	Х — Щ — Г — Д — Щ — Д — К	Х/Д — Щ — Г — Д — Щ — Д — К
Белизна	70%	80%	90%	90%

Изменение схем отбелки сульфатной целлюлозы для химической переработки представлено в табл. 14.16.

Таблица 14.16. Изменение схем отбелки сульфатной целлюлозы для химической переработки в 1960–1970-е гг.

Годы производства	1960-е гг.	1970-е гг.
Вид отбелки	Отбелка с хлором	
Схема отбелки кордной целлюлозы для высокопрочного корда	Х — Щ — Щ — Г — Г — Щ — Д — К	Х/Д — Щ — Г — Д — Щ — Д — Г — К Х — Щ — Г — ХО — ГО — Д — Г — К
Схема отбелки вискозной целлюлозы	Х — Щ — Г — Д — Щ — Д — Г — К	Х — Щ — Г — Д — Щ — Д — Г — К

Примечание: принятые сокращения ступеней отбелки: Х/Д — совместная обработка хлорированием и диоксидом хлора; Щ — щелочение; Г — гипохлоритная; ХО — холодное облагораживание; ГО — горячее облагораживание; Д — диоксида хлора; К — кисловка.

Загрязненность абсолютно всех отбельных фильтратов оказалась исключительно высокой, и требуется значительное разбавление, чтобы достигнуть относительно безопасного уровня загрязнения для человека. Таким образом, преимущество кислородсодержащих реагентов (кислород, пероксид водорода, озон) по сравнению с хлором только в том, что их стоки не содержат ионов хлора и поэтому могут вместе с черным щелоком сжигаться в содорегенерационном котлоагрегате (СРК). Это стало основополагающей стратегией совершенствования отбелики технической целлюлозы.

В октябре 2000 г. на Котласском ЦБК впервые в послереформенной России была внедрена современная схема отбелики ECF сульфатной целлюлозы из лиственных пород древесины со степенью кислородно-щелочной обработки и с использованием пероксида водорода и молекулярного кислорода на ступени щелочения (ЩОП). Отказ от использования молекулярного хлора и гипохлорита позволил: повысить качество белевой целлюлозы; в три и более раз сократить количество хлорорганических соединений (АОХ), поступающих на очистные сооружения от отбельной установки; полностью исключить образование хлороформа. Помимо резкого снижения количества АОХ, поступающего на биологическую очистку, степень очистки стоков от АОХ достигла ~80% вместо ~30% при отбелке хлором и гипохлоритом. Все это обусловило улучшение охраны окружающей среды при сокращении расходов на очистку сточных вод.

Мировая целлюлозно-бумажная промышленность в отбелке целлюлозы для бумаги и химической переработки в 1980–2000-е гг. располагала на тот период времени наилучшими доступными технологиями, которые представлены в табл. 14.17–14.20.

В табл. 14.17 представлены передовые схемы отбелики при производстве сульфитной белевой целлюлозы. Отбелка сульфитной целлюлозы по бесхлорной технологии ECF протекает достаточно легко до белизны 90% при использовании ступени диоксида хлора (Д), тогда как переход на отбелку с полным отсутствием хлорсодержащих реагентов (Total Elementary Chlorine Free, TCF) делает затруднительным достижение высокой белизны полуфабриката. Исследования токсичности стоков показали: стоки отбелики от кислородсодержащих реагентов и хлорсодержащих реагентов имеют одинаково высокую токсичность, поэтому с точки зрения охраны природы технология TCF не имеет преимуществ, если только стоки от отбелики не сжигаются в СРК.

Таблица 14.17. Передовые схемы отбелики сульфитной целлюлозы для производства бумаги в промышленно развитых странах в 1980–2000-е гг.

Годы производства	80-е гг.		1990–2000-е гг.	
	ECF		ECF	TCF
Вид отбелики	ECF		ECF	TCF
Схема отбелики	О — Д — П — К		О — Д — П — К	ЩОП — К ЩОП — П — К
Белизна	90%		90%	83–89%

Примечание: О — кислородно-щелочная делигнификация; Д — отбелка диоксидом хлора; П — отбелка пероксидом водорода; К — кисловка.

В табл. 14.18 показано совершенствование схем отбелики сульфитной целлюлозы для химической переработки. В схемах отказались от использования хлора, но для регулирования вязкости целлюлозы по-прежнему применялся гипохлорит, который заменили на озон.

В табл. 14.19 представлено изменение передовых схем отбелики при производстве сульфатной белевой целлюлозы. Отбелка этой целлюлозы требует более жестких условий процесса делигнификации целлюлозы с использованием кислорода (две ступени) и озона. Для достижения высокой белизны товарной целлюлозы используется ступень отбелики диоксидом хлора (Д).

Таблица 14.18. Передовые схемы отбелки сульфитной целлюлозы для химической переработки в 1980–2000-е гг.

Годы производства	1980-е гг.	1990–2000-е гг.
Вид отбелки	Отбелка без молекулярного хлора	
Схема отбелки	ГО/О — Г ₁ — Г ₂ — Д — К ГО/О — Г — П — К	МХО/ГО — Г ₁ — Г ₂ — Д — К ГО/О — Оз — П — К (ТСФ с 1999 г.)

Примечание: принятые сокращения ступеней отбелки: ГО/О — степень ГО — горячее облагораживание и без промывки последующая ступень обработка кислородом — О; Г — гипохлоритная; Д — диоксида хлора; П — пероксида водорода; К — кислотка; МХО/ГО — степень МХО — механохимическая обработка массы в аппарате типа «Фротапалпер» с последующей без промывки ступенью горячего облагораживания — ГО; Оз — ступень озонирования.

Таблица 14.19. Изменение базовых схем отбелки сульфатной целлюлозы для производства бумаги в промышленно развитых странах в 1980–2000-е гг.

Годы отбелки целлюлозы	1980-е гг.	1990–2000-е гг.	
Вид отбелки	ECF	ECF	ТСФ
Схемы отбелки	О — Д — ЩО — Д — ЩП — Д — К	О — Д — ЩОП — Д — ЩП — Д — К О — Д — ЩОП — Д — ЩП — Д — К О-О — Д — Щ — Д — К О-О — Д — Q — ПО — К О — Оз — Щ — Д — К	О — Q — ПО — Оз — ПО — К О — Q — Оз — ПО — П — К

Примечание: О — кислородно-щелочная обработка в одну ступень и О-О — в две ступени; ЩО — щелочение с добавкой кислорода; П — отбелка пероксидом водорода; ЩП — щелочение с добавкой пероксида водорода; ЩОП — щелочение с добавкой пероксида водорода и кислорода; Q — обработка хелатирующими реагентами; ПО — совместная обработка пероксидом водорода и кислородом под избыточным давлением; Оз — обработка озоном; К — кислотка.

Таблица 14.20. Передовые схемы отбелки сульфатной целлюлозы для химической переработки в 1980–2010-е гг.

Годы отбелки целлюлозы	1980-е гг.	1990–2010-е гг.
Вид отбелки	Отбелка с хлором	
Схема отбелки кордной целлюлозы для высокопрочного корда (из хвойной целлюлозы)	Х/Д — Щ — Г — Д — Щ — Д — Г — К Х — Щ — Г — ХО — ГО — Д — Г — К	нет информации
Схема отбелки вискозной целлюлозы – из хвойной целлюлозы – из лиственной целлюлозы	Х — Щ — Г — Д — Щ — Д — Г — К	О — Щ — Г — Д — Щ — Д — Г — К О-О — А — (O ₃ Q) — П

Необходимо отметить, что в период с 1999 по 2009 г. мировое производство целлюлозы для химической переработки не превышало 3 млн т. В 2010 г. мировой спрос на вискозную целлюлозу составил 5,1 млн т, что было связано с неурожаем хлопка, и цены с 550 долларов/т выросли более чем в 4 раза — до 2400 долларов/т. Это подтолкнуло многие компании планировать репрофилирование существующих производств на выпуск целлюлозы для химической переработки или запустить неработающие мощности.

ЦИКЛЫ РАЗВИТИЯ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Совершенствование производства бумаги и волокнистых полуфабрикатов меняет технологические процессы, создает новые виды продукции, улучшает условия труда, структуру себестоимости продукции, ее рентабельность.

Историю производства бумаги и целлюлозных полуфабрикатов можно условно разделить на циклы: появление технической идеи и локальное производство, зарождение мелкосерийного производства и цикл массового промышленного производства.

Цикл зарождения производства бумаги характеризуется исключительно ручным разделением природных волокон и тряпья на отдельные волокна, ручным отливом суспензии волокон на сетке, последующим отжимом и сушкой. Как результат получение бумаги характеризуется низкой производительностью труда.

Повышение спроса на бумагу стимулировало появление мелкосерийного производства. Поскольку источник волокон — тряпье, поэтому дальнейшее развитие технологии было связано с созданием бумажных мельниц, на которых стали размалывать тряпье, используя силу ветра и потока воды, затем ступу и, наконец, ролл, что и стало основой производства волокон для мелкосерийного производства бумаги. Это повысило производительность труда в производстве волокнистого сырья, тогда как производство бумаги ручным черпанием массы и остальные процессы сохранились без изменения и поэтому с повышением объема производства бумаги требовали увеличения численности работников.

Зарождение промышленного производства связано с ростом потребности в бумаге, что стимулировало создание бумагоделательной машины и получение волокон из древесины. Так, через 1800 лет после появления бумаги началось становление целлюлозно-бумажной промышленности. Развитие отрасли происходило благодаря постоянно растущему спросу на новые виды продукции, необходимые для удовлетворения потребности человека и развития науки и техники.

Технологические циклы становления целлюлозно-бумажной отрасли можно соотнести с основными циклами развития мировой промышленности (табл. 14.21).

Таблица 14.21. Характеристика технологических циклов развития производства бумаги

Период, годы	Цикл	Вид продукции	Основные виды деятельности технологического цикла	Технологические лидеры
1740–1830	Первый (раннее производство бумаги)	Бумага для печати (книжная, газетная) и для письма	Текстильная промышленность, текстильное машиностроение, выплавка чугуна, обработка железа	Великобритания, Франция
1830–1880	Второй (начало технического развития)	Бумага для печати, письма, рисования, чертежная, упаковочная, обойная, фильтровальная, патронная туалетная, бумажные полотенца и др.	Паровой двигатель, железнодорожное строительство, транспорт, машиностроение, пароходостроение, угольная промышленность, станкоинструментальная промышленность, черная металлургия	Великобритания, Франция, Германия, США
1880–1930	Третий (начало механизации производства)	Целлюлоза для химической переработки, расширение ассортимента писчепечатных и тароупаковочных видов бумаги и картона, санитарно-гигиенические виды бумаги	Электротехническое, тяжелое машиностроение, производство и прокат стали, электроэнергетика, неорганическая химия	Германия, США, Великобритания, Франция, Нидерланды

Таблица 14.21 (окончание)

Период, годы	Цикл	Вид продукции	Основные виды деятельности технологического цикла	Технологические лидеры
1930–1980	Четвертый (совершенствование технологий производства)	Расширение ассортимента целлюлозы для химической переработки и писчепечатных «деловых» бумаг, тароупаковочных и специальных видов бумаги для электронной коммуникации, санитарно-гигиенические виды бумаги	Автомобилестроение, цветная металлургия, органическая химия, производство и переработка нефти	США, страны Западной Европы, СССР, Канада, Австралия, Япония
1980–1990	Пятый (повышение качества бумаги и расширение ассортимента бумаги и картона)	Микрокристаллическая целлюлоза, «деловая» бумага (канцелярская, для множительной техники, копийная бумага), тароупаковочная продукция, санитарно-гигиенические виды бумаги	Электронная промышленность, телекоммуникации, роботостроение, производство и переработка газа, информационные услуги	США, ЕС, Япония,

Первый технологический цикл

Промышленный период производства бумаги начинается с появлением оборудования для облегчения ручного труда: размола тряпья на отдельные волокна и замены ручного отлива бумаги на машинное черпание массы. Однако технический уровень оборудования оставил низкие темпы роста производительности труда и ручной труд продолжал преобладать над машинным. Первые бумагоделательные машины лишь формовали и прессовали бумажное полотно, а сушили бумагу, как и раньше, на воздухе и вручную делали обработку поверхности клеем каждого листа. Поэтому проклейка непосредственно в бумажной массе перед отливом, предложенная в 1807 г. изобретателем Иллингом, упростила процесс выработки бумаги. В 1823 г. на бумагоделательной машине появились сушильные цилиндры с угольными жаровнями, которые упростили сушку бумажного полотна (позднее для нагрева сушильных цилиндров стали использовать пар). В 1826 г. под сетку машины поместили отсасывающие ящики с вакуумными насосами, что увеличило производительность отлива бумаги на сеточном столе. Так появлялись технические решения, которые повысили производительность бумагоделательных машин, но ручного труда осталось очень много.

Второй технологический цикл

Машинное производство бумаги требовало больше волокнистого сырья, источником которого было только тряпье. Поэтому получение в 1843 г. из древесины Фридрихом Готтлобом Келлером древесной массы было событием эпохальным. В 1845 г. было показано, что бумагу можно получить в композиции 60% древесная масса и 40% ветошь. Это значит, что можно производить бумагу при сокращении в два раза расхода дефицитного тряпья на выработку бумаги, заменяя его дешевой древесной массой. В 1852 г. построены первые две промышленные машины для производства древесной массы. Так в середине XIX в. началась эра дефибрерной древесной массы (ДДМ), которая основала производство механической массы. В 1854 г. Оттмар Мергенталер разработал первую работоспособную

наборную машину, которая обеспечила головокружительный рост спроса на газетную бумагу. Это стимулировало поиск новых технологий получения волокна из древесины, и в 1857 г. ученые обнаружили в древесине окисляемую субстанцию, которая получила название лигнин, а в 1863 г. был выдан один из первых патентов на метод кислотной делигнификации, посредством которой древесная ткань распадалась на отдельные волокна (клетки). В этом цикле создавались технические предпосылки создания целлюлозно-бумажной промышленности.

Таблица 14.22. Основные этапы технологических циклов развития целлюлозно-бумажной промышленности

Цикл	Научно-технический этап	Технико-экономический этап	Экономическо-социальный этап	Социально-регуляторный этап
Первый (раннее производство бумаги)	Появление ролла для измельчения тряпья на отдельные волокна и первых бумагоделательных машин для механизации отлива бумаги. Совершенствование их конструкции	Увеличение объемов производства бумаги за счет увеличения производства волокон из тряпья и механизации отлива бумаги	Доступность бумаги на рынке	Рост численности бумажных мастеров и подмастерья при сохранении тяжелых условий труда
Второй (начало технического развития)	Производство древесной массы. Разработка наборной машины для печати	Увеличение объемов производства за счет древесной массы и увеличения производительности оборудования	Резкий рост потребности в газетной бумаге	Рост численности бумажных мастеров и подмастерья при сохранении тяжелых условий труда
Третий (начало механизации производства)	Производство технической целлюлозы по кислотному и щелочному способам варки. Механизация производства бумаги	Целлюлоза для химической переработки. Увеличение объемов производства бумаги за счет технической целлюлозы и увеличения производительности бумагоделательного оборудования	Начало производства химических волокон, рост потребления писчепечатной бумаги и санитарно-гигиенических видов	Рост численности и квалификации работников, улучшение условий труда
Четвертый (совершенствование технологий производства)	Совершенствование производства древесной массы и технической целлюлозы, производства макулатурных волокон, бумаги и картона	Увеличение объемов производства бумаги и картона за счет использования целлюлозных, макулатурных волокон и древесной массы	Рост объемов писчепечатных видов продукции, в том числе «деловых» бумаг, санитарно-гигиенических и тароупаковочных видов продукции	Рост квалификации работников, улучшение условий труда

Таблица 14.22 (окончание)

Цикл	Научно-технический этап	Технико-экономический этап	Экономически-социальный этап	Социально-регуляторный этап
Пятый (повышение качества картоно-бумажной продукции и снижение затрат)	Повышение степени автоматизации производства, снижение производственных затрат	Увеличение производства целлюлозы до 1–1,95 млн т/год одним потоком. Снижение затрат на производство бумаги и картона за счет большего использования в композиции минеральных наполнителей, листовного волокна и макулатурных волокон	Под влиянием ужесточения природоохранного законодательства отказ от неэкологичных технологий. Использование для отбеливания кислорода, озона, пероксида водорода взамен хлора и гипохлорита.	Сокращение численности работников, переход на автоматическое управление процессом производства и автоматическую диагностику технического состояния оборудования

Третий технологический цикл

Цикл характеризуется развитием производства древесной массы, технической целлюлозы из древесины кислотным (сульфитным) и щелочным (натронный, сульфатный) способами, проводится дальнейшее усовершенствование бумагоделательного оборудования и тем самым создается целлюлозно-бумажная промышленность. В 1882 г. С. Ф. Далем был открыт сульфатный способ варки целлюлозы. В 1900-е гг. ширина бумагоделательной машины уже достигла 4 м, скорость — 140 м/мин, а производительность — 20 т бумаги в сутки. На бумагоделательной машине установили электрический двигатель и стали проектировать специальные машины для производства определенных сортов бумаги и картона. Впервые в Германии, а потом и в других странах появилось производство целлюлозы для химической переработки. Целлюлоза используется для производства порохов и химических волокон в легкой промышленности. Уже в 1920-е гг. ширина машины увеличилась до 6 м, скорость — до 300 м/мин, а производительность — до 100 т в сутки, или увеличилась в 5 раз по сравнению с началом века. В данном цикле развития большее распространение получил сульфитный способ производства целлюлозы, составляющий 75% мирового производства целлюлозы. Но в 1933 г. построен первый регенерационный котел для сульфатных щелоков, который существенно снизил затраты на производство сульфатной целлюлозы. Поэтому уже к концу 1930-х гг. активно строились сульфатцеллюлозные заводы, особенно в США. Этому способствовало два фактора: практическое исчерпание древесины ели в лесосырьевой базе страны, которая необходима для сульфитной варки, и значительный рост потребности в упаковочной бумаге и картоне, которые лучше производить из сульфатной целлюлозы, получаемой из любого вида древесного сырья.

Четвертый технологический цикл

Цикл характеризуется влиянием экономических и экологических факторов на развитие производства. Энергетический кризис 1970-х гг. резко увеличил стоимость производства целлюлозы. Повысились требования к охране окружающей среды, особенно для производства сульфитной целлюлозы, которое сбрасывало стоки без очистки в ближайшие водоемы. Сложившаяся ситуация способствовала быстрой разработке и внедрению новых способов производства механической массы из хвойных (ТММ) и лиственных пород (ХТММ), которые позволили частично или полностью заменить сульфитную целлюлозу в композиции некоторых массовых видов бумаги. Сульфитные заводы стали модернизироваться с внедрением системы регенерации сульфитных щелоков, переоборудовываться на производство механической массы или закрываться.

Дефицит лесных ресурсов и для сокращения затрат на производство бумаги увеличивается, доля макулатуры в общем потреблении волокнистого сырья в 1970-е гг. составила 22%, а в 1980-е — уже больше 30%. Макулатура успешно применяется для выработки санитарно-гигиенических и бытовых видов бумаги, для которых используется как обесцвеченная (в 1975 г. произвели 2,2 млн т, а в 1978-м — уже 4,4 млн т), так и не обесцвеченная макулатурная масса. В производстве писчих и печатных видов бумаги также стали применять обесцвеченное макулатурное волокно.

С целью снижения затрат и сокращения вредного воздействия на природу стали переходить от использования в производстве низкой концентрации массы — 3% к средней концентрации — 10%, что сократило расход воды с 32 м³/т целлюлозы до 9 м³/т целлюлозы, или в 3,5 раза. Переход на обработку массы средней концентрации позволил эффективно использовать в отбелке целлюлозы молекулярный кислород взамен молекулярного хлора и интенсифицировать процессы отбелки. В 1970 г. в ЮАР на заводе фирмы SAPPi запущена в эксплуатацию первая промышленная установка кислородно-щелочной обработки целлюлозы. Открыта эра технологии отбелки без молекулярного хлора (ECF) с прекращением использования молекулярного хлора для отбелки целлюлозы. Появились схемы отбелки, в которых отработанный щелок после КЦО поступает вместе с черным сульфатным щелоком на сжигание в СРК, что в два раза сократило количество загрязнений сульфатцеллюлозного завода, поступающих на очистные сооружения от отбельного цеха.

Для снижения дефицита хвойной древесины на специализированных сульфатцеллюлозных производствах активно используют на варку листовые породы древесины. В композиции бумаги успешно используют замену 30% хвойных волокон на листовое волокно.

Пятый технологический цикл

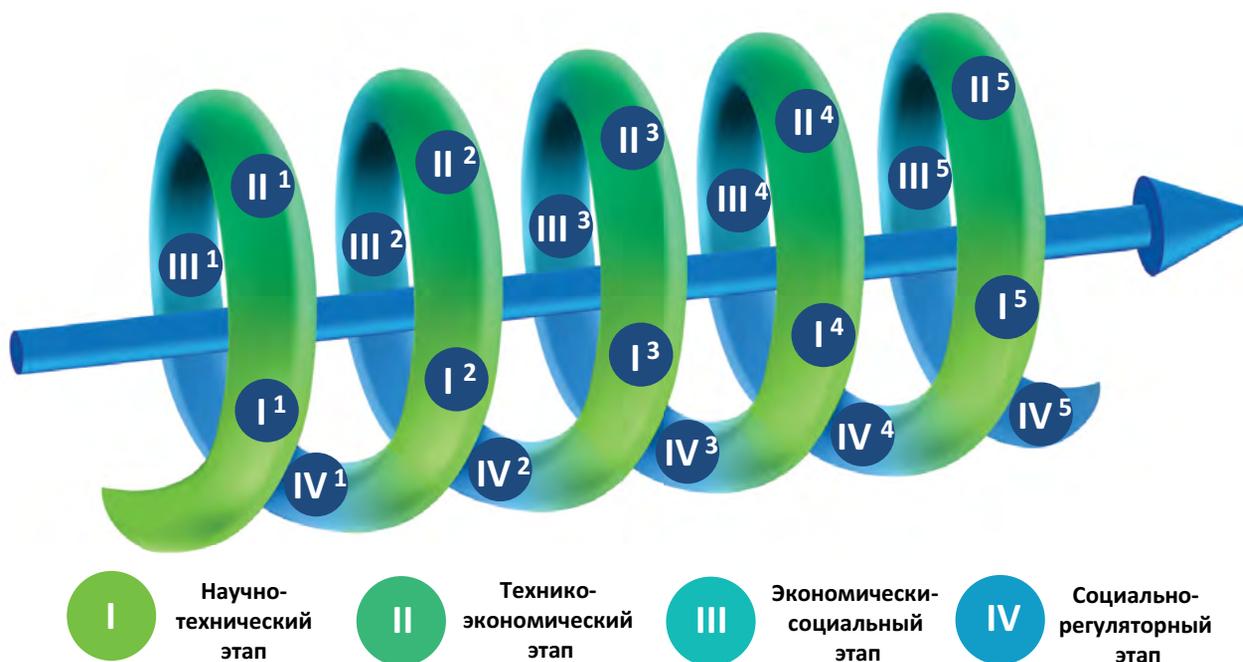
Цикл характеризуется широкой номенклатурой выпускаемых изделий, которая составляет 3500 видов бумаги, картона, бумагоподобных материалов (в Российской Федерации — около 450). Снижение затрат и снижение воздействия на окружающую среду — основные факторы, влияющие на дальнейшее совершенствование технологии производства. Для снижения затрат в композиции бумаги успешно используют замену 90% хвойных волокон на листовое волокно, широко используются минеральные наполнители. Внедряются автоматизированные системы оперативно-диспетчерского управления (АСОДУ), осуществляющие контроль и управление технологическими процессами, а также осуществляющими диагностику состояния оборудования, оценивающими надежность его работы. Внедряются технологии бесхлорной отбелки (ECF) и «легкая» ECF. В схемах отбелки широко используется кислород, озон, перекись водорода взамен молекулярного хлора и гипохлорита натрия, и сброс хлорорганических соединений (АОХ) в водоем сокращается в 3–4 раза, а сброс хлороформа прекращается.

Растут мощности всех технологических звеньев производства сульфатной целлюлозы, бумаги и картона. Созданы предпосылки для создания единичных потоков производства целлюлозы мощностью 1,0–1,95 млн т/год и бумагоделательные машины производительностью 430 тыс. т бумаги в год, что в 60 раз превышает мощности БДМ, созданных в 1900 г.

Эволюция технологий целлюлозно-бумажной промышленности

Необходимо отметить, что каждый цикл обусловлен определенным этапом, который дает новый толчок развитию технологий. Последовательное прохождение всех этапов приводит к завершению цикла развития отрасли, после чего цикл повторяется (рис. 14.8).

В истории развития отраслей промышленности эффективное использование ресурсов рассматривают как важнейшее условие перехода технологического развития на новый уровень. Описывают реакции отрасли на изменение условий ее деятельности как единого целого, не включая описания механизма какого-либо технологического звена.



- | I | II | III | IV |
|---|---|---|--|
| Научно-технический этап | Технико-экономический этап | Экономическо-социальный этап | Социально-регуляторный этап |
| I¹ — Появление бумагоделательных машин для механизации отлива бумаги | II¹ — Увеличение объемов производства бумаги | III¹ — Доступность бумаги на рынке | IV¹ — Рост численности бумажных мастеров и подмастерья при сохранении тяжелых условий труда |
| I² — Появление производства древесной массы. Появление наборной машины для печати | II² — Увеличение объемов производства бумаги за счет использования древесной массы и увеличения производительности оборудования | III² — Резкий спрос на газетную бумагу | IV² — Рост численности бумажных мастеров и подмастерья при сохранении тяжелых условий труда |
| I³ — Начало производства технической целлюлозы. Механизация производства бумаги | II³ — Увеличение объемов производства за счет технической целлюлозы и увеличения производительности бумагоделательного оборудования | III³ — Рост потребления писчебумажной бумаги и санитарно-гигиенических видов бумаги | IV³ — Рост численности и квалификации работников, улучшение условий труда |
| | | | I⁴ — Совершенствование производства древесной массы, технической целлюлозы, получения бумаги и картона |
| | | | II⁴ — Увеличение ассортимента продукции и объемов производства за счет увеличения производства технической целлюлозы |
| | | | III⁴ — Рост видов продукции «деловых» бумаг и тароупаковочных видов продукции |
| | | | IV⁴ — Рост квалификации работников, улучшение условий труда |
| | | | I⁵ — Повышение автоматизации производства |
| | | | II⁵ — Увеличение объема производства целлюлозы и картонно-бумажной продукции |
| | | | III⁵ — Исключение использования для отбеливания целлюлозы хлора и гипохлорита, отказ от неэкологических технологий |
| | | | IV⁵ — Сокращение численности работников, переход работников на автоматическое управление процессом производства |

Рис. 14.8. Эволюция технологий целлюлозно-бумажной промышленности

ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Технология и оборудование производства механической (древесной) массы

Механической массой называют волокнистые полуфабрикаты высокого выхода 85–98%, вырабатываемые путем механического разделения древесины на волокна при удельном расходе энергии (УРЭ) свыше 1200 кВт·ч/т. Механическую массу подразделяют на два типа.

Первый тип — механической масса с выходом 93–98%, в производстве которой не используют химические реагенты. Называют — «чисто» механическая масса. К этому виду «чисто» механической массы относятся: ДДМ — традиционная дефибрерная древесная масса с выходом 93–98%, получается истиранием древесины при атмосферном давлении на дефибрерных камнях дефибреров различных типов: цепных, прессовых, винтовых и т. д.;

ДМД или ДМД/Д — механическая масса, получается истиранием древесины на дефибрерных камнях под давлением на двухпрессовом дефибрере, и ее разновидности (ДМД-Супер, ДМД-70 и т. д.); РММ или РДМ — рафинерная механическая или рафинерная древесная масса, полуфабрикат, получается при атмосферном давлении за счет механической обработки щепы в дисковых мельницах; ТММ — термомеханическая масса, получается термогидролитической обработкой (пропаркой) щепы при давлении 100–300 кПа, температуре 100–130°С и размоле на дисковых мельницах под давлением в 1–3 ступени.

Второй тип включает различные виды химико-механической массы. При ее производстве используют щепу, которая перед разделением на волокна в процессе размола может пройти предварительную тепловую и/или химическую обработку, поэтому существует много разновидностей механической древесной массы и их подразделяют на четыре вида:

I — «Легкая» обработка щепы химическими реагентами. ХТММ — химико-термомеханическая масса. Получается совместной химической и термогидролитической обработкой щепы химическими реагентами с расходом до 10% к массе абсолютно сухой древесины (а. с. д.) и размолем под давлением в две ступени.

II — «Химически модифицированная масса», включает полуфабрикаты или их отдельные фракции, обработанные химическими реагентами. ТМХМ — термомеханохимическая масса — получают добавкой химикатов после 1-й ступени размола под давлением, в процессе размола или после размола; ХММ — химико-механическая масса из отходов сортирования или длинноволокнистой фракции всех видов механической массы. Технология производства заключается в выделении из отходов сортирования механической массы ее длиноволокнистой фракции, которая обрабатывается сульфитом натрия при температуре 80–100°С и затем размалывается.

III — Высокая степень сульфирования ХММ получается интенсивной обработкой щепы с расходом химических реагентов 10–15% и выше. Размол проводится при атмосферном давлении в две ступени с УРЭ свыше 1000 кВт·ч/т. СХММ — сульфированная химико-механическая масса; БПОВВ — бисульфитный полуфабрикат сверхвысокого выхода; БХММ — бисульфитная химико-механическая масса; СВВ — сульфитная масса высокого выхода, получают интенсивной обработкой щепы бисульфитом; ССВВ — сульфитная масса сверхвысокого выхода; ОВВСМ — сульфитная масса очень высокого выхода.

IV — Бессернистая химико-механическая масса: ЩПММ — щелочная пероксидная механическая масса, которую получают одно-, двух- или трехступенчатой обработкой щепы щелочным раствором пероксида водорода и размолем. Используют щепу древесины лиственных и хвойных пород или их смесь; М — процесс отбели щепы; БХММ — беленая ХММ. Используют древесину лиственных пород. Производства этих масс схожи по технологии и оборудованию с ЩПММ; ХЩ — холодно-щелочной полуфабрикат производят с выходом 85–90% из лиственных пород древесины, пропиткой щепы раствором соды при температуре ниже 100°С и размолем при атмосферном давлении.

Породы древесного сырья для производства механической массы

На рис. 14.9 представлен поперечный разрез древесной ткани и ее разделение на отдельные волокна механическим способом по технологии РММ, ТММ и ХТММ.

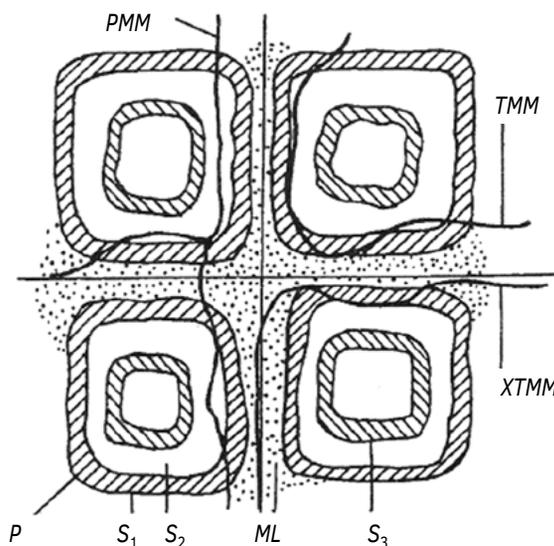


Рис. 14.9. Особенности разделения древесины на волокна при различных методах производства механической массы из щепы:

ML — срединная пластинка; P — первичная оболочка; S₁, S₂ — наружный и средний слой вторичной оболочки соответственно; S₃ — внутренний слой вторичной оболочки — третичная оболочка

При производстве РММ происходит гидролитическая обработка щепы, лигнин не размягчается, срединная пластинка остается жесткой и волокна при размоле в основном разрушаются в поперечном направлении. Образуется значительное количество мелочи и костры, поэтому РММ имеет самые низкие показатели механической прочности среди всех видов механической массы, полученной из щепы. При производстве ТММ термогидролитическая обработка способствует пластификации лигнина и структура волокон становится менее жесткой. Волокна в древесной ткани основном отделяются друг от друга в продольном направлении по срединной пластинке, а в поперечном направлении разрываются мало. В результате получается значительное количество длинных волокон и небольшое содержание мелочи, что и обеспечивает высокие механические свойства массы. Технология ХТММ предусматривает химико-термогидролитическую обработку щепы, которая обеспечивает еще большее содержание длинных волокон по сравнению с ТММ. ХТММ характеризуется более высокими механическими свойствами массы при незначительном снижении выхода.

Выбор породы древесины и свойства древесного сырья определяются требованиями к качеству бумаги и картона, в композиции которых используется данная механическая масса. Из низкосортного древесного сырья даже современные технологии не в состоянии получить механическую массу высокого качества. Наилучшим сырьем для производства всех видов механической массы, производимой без применения химических реагентов (ДДМ, ТММ) и с химическими реагентами ХТММ, ХММ, является свежесрубленная древесина ели и полученные полуфабрикаты из нее имеют наилучшие сочетания показателей механической прочности и оптических свойств. Лиственные породы, особенно осина, широко применяются для производства ХТММ и ХММ, что важно, поскольку в производство вовлекаются менее ценные и не дефицитные породы древесного сырья. Использование лиственных пород требует применения щелочных реагентов, необходимых для набухания щепы перед размолем, которое облегчает разделение древесной ткани на волокна без значительного их повреждения.

С целью упрощения описания оборудования и технологических схем производства основных механических масс условно разделим их на две группы: первая — древесная масса, вырабатываемая из балансов, — дефибрерная древесная масса, и вторая — древесная масса, вырабатываемая из щепы, — механическая древесная масса.

Подготовка древесного сырья. Поступающее древесное сырье в виде круглого леса проходит окорку и разрезается на слешерном столе на балансы для производства ДДМ или рубится на щепу для производства механической массы (описание процесса окорки балансов и рубки щепы описано в разделе *Технология производства технической целлюлозы*).

Дефибрерная древесная масса, вырабатываемая из балансов. Механический способ производства древесной массы под атмосферным давлением (ДДМ) проработал в мире более 100 лет и был единственным в производстве механической массы вплоть до 1960-х гг. Недостатком производства ДДМ было низкое качество массы, поэтому появились другие технологии дефибрирования. На рис. 14.10 представлено обычное дефибрирование (ДДМ) под атмосферным давлением (а), получение дефибрерной массы под избыточным давлением (ДМД) (б) и термдефибрирование (в), что обеспечило более высокие механические свойства ДМД по сравнению с обычной ДДМ и дало возможность использовать древесину осины и автоматизировать процесс.

Переход к термдефибрированию (ТДМД) обусловлен необходимостью равномерного распределения температуры в зоне дефибрирования, что снижает УРЭ на дефибрирование и улучшает механические свойства массы.

На рис. 14.11 представлена технологическая схема производства ДМД.

Преимуществом дефибрера, работающего под давлением, является автоматизированная система загрузки баланса. Система автоматически подает балансы на вход в прессовую коробку с регулированием расхода древесины датчиками уровня на конвейере. Процесс формирования партии баланса и подача ее в дефибрер показаны на рис. 14.12.

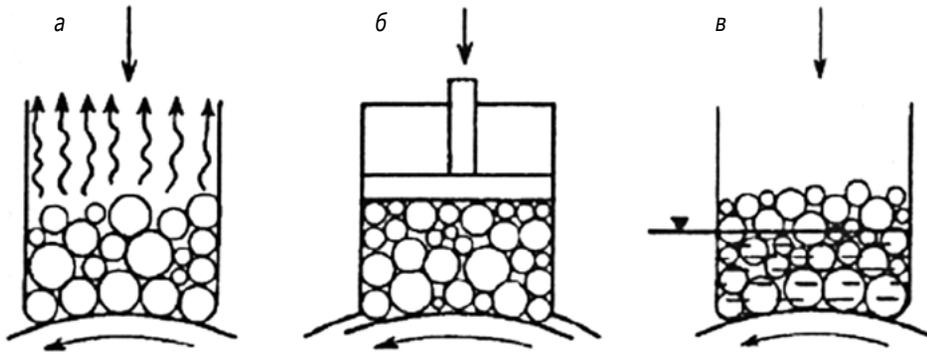


Рис. 14.10. Схемы процессов дефибрирования:

а) обычного (атмосферное давление, локальный нагрев, испарение воды); б) под давлением (закрытая шахта, избыточное давление 0,2–0,5 Мпа); в) термдефибрирования (слой воды 20–50 см над зоной дефибрирования)

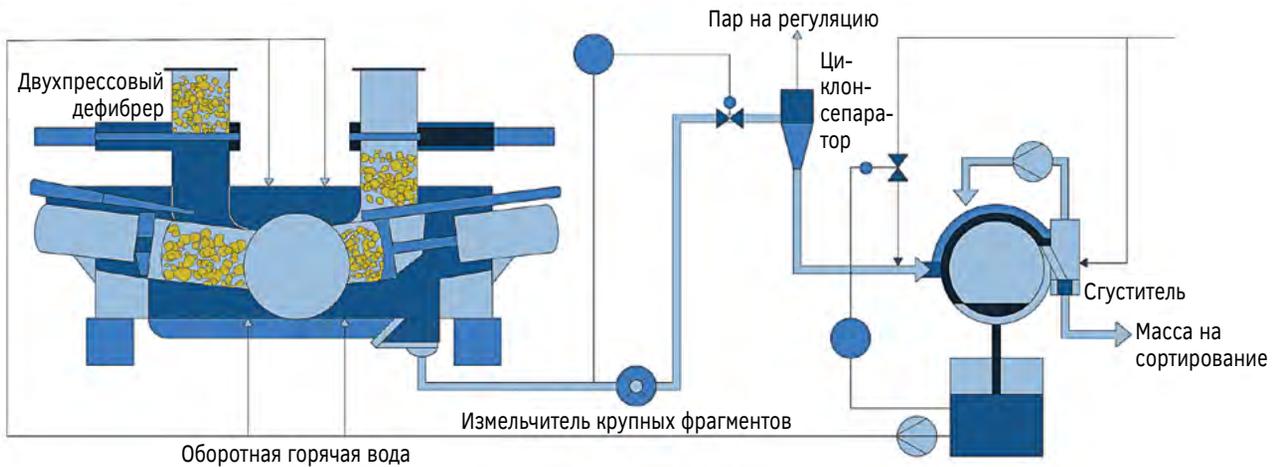


Рис. 14.11. Технологическая схема производства ДМД

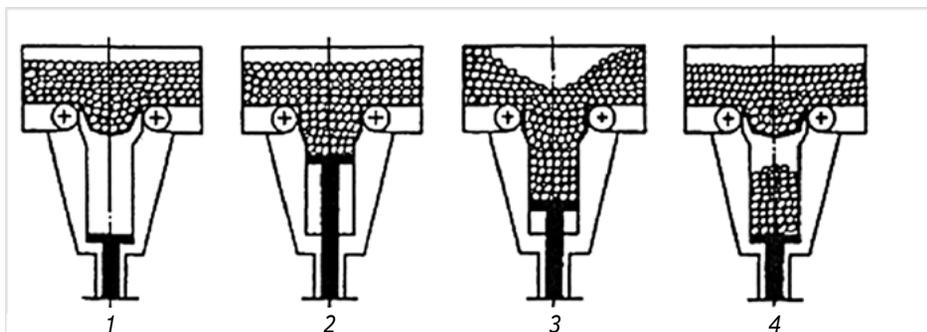


Рис. 14.12. Процесс формирования партии баланса и подача ее в дефибрер:

1 — опускающийся стол находится внизу, захваты закрыты; 2, 3 — стол начинает подниматься, захваты раскрываются, затем стол опускается в положение формирования порции; 4 — стол продолжает опускаться до конечного положения, захваты закрываются, порция готова для подачи

Дефибрирование древесины происходит под давлением 0,2–0,45 МПа, при температуре sprысковой воды 70–120°С и концентрации массы в ванне 1,5%. Температура воды при дефибрировании поддерживается ниже температуры кипения воды, что положительно влияет на качество массы. Из ванны дефибрера (1) на рис. 14.11 масса под давлением поступает в молотковую мельницу (2) для измельчения крупных фрагментов. Далее масса через контрольный клапан выдувки поступает в циклон-сепаратор (3). При прохождении массы через клапан давление понижается до атмосферного, а пар, образующийся при мгновенном вскипании горячей массы, отделяется в циклоне-сепараторе и направляется в систему регенерации тепла. После циклона масса с концентрацией 1,5% направляется в напорный сгуститель (4), в котором при избыточном давлении от массы отделяется горячая вода и концентрация массы повышается до 10–15%. Вода, отделившаяся от при сгущении массы, возвращается на sprыски дефибрера для регулирования концентрации массы в ванне (обеспечивается циркуляция тепла в производственном цикле). После сгущения масса разбавляется до концентрации 1% и направляется на сортирование. На рис. 14.13 представлена принципиальная технологическая схема производства ДМД-70 (температура sprысковой воды 70°С) с сортированием и очисткой массы.

Механическая древесная масса, вырабатываемая из щепы. Повышение качества древесной массы и снижение затрат на ее производство произошло при переходе на размол щепы в дисковых рафинерах. Рассмотрим технологию и принципиальную схему производства ТММ (рис. 14.14), которую получают из предварительно пропаренной щепы при 100–140°С и давлении 0,1–0,3 МПа в течение 0,5–3 минут. Размол осуществляют, как правило, в две ступени. Первую ступень размола проводят при повышенном давлении. На второй ступени давление может быть атмосферным (ТММ) или избыточным (ТММ «Тандем»). Нужно отметить, что бумагообразующие свойства ТММ значительно лучше, но УРЭ выше ДМД. Однако благодаря более высоким механическим свойствам массы она в композиции бумаги замещает значительную часть целлюлозы (табл. 14.25), что обеспечивает экономическую эффективность производства несмотря на повышенный удельный расход электрической энергии. Как показали исследования, при температуре 120–130°С лигнин срединной пластинки настолько размягчается, что волокна могут легко отделяться от лигнинной матрицы при минимальном их повреждении. Однако данная температура является для лигнина критической и лигнин приобретает текучесть. Он обволакивает поверхность волокон, а при охлаждении массы затвердевает с образованием пленки, на разрушение которой при размоле тратится дополнительная энергия. Поэтому температура при получении ТММ поддерживается в диапазоне 105–115°С, что достаточно для размягчения щепы при получении ТММ, пригодной для большинства видов бумажной продукции.

Таблица 14.23. Удельный расход энергии на производство и показатели качества ДДМ, ТДДМ, ДМД и ТММ

Показатели	Вид механической массы			
	ДДМ	ТДДМ	ДМД	ТММ
Общий удельный расход энергии, кВт·ч/т	1470	1560	1580	2360
Степень помола, °ШР	65	65	65	69
Прочность на разрыв, Н	29	34	37	38
Разрывная длина, км	2,5	2,9	3,2	3,4
Сопrotивление раздиранию, мДж/м	610	740	790	980
Белизна, %	63	63	60	56

Технология основных способов производства механической массы из щепы представлена в табл. 14.24.

Таблица 14.24. Технологические режимы основных способов производства химико-механической массы из щепы хвойных и лиственных пород древесины

Вид массы	Расход химических реагентов, % к массе а. с. волокна		рН	Температура, °С	Продолжительность обработки, мин	Выход, %
	Na ₂ SO ₃	NaOH или Na ₂ CO ₃				
Древесина хвойных пород						
ХТММ	2–3	–	9–10	120–140	2–10	94–95
ХММ	10–15	–	9–10	160	30	90
СВВ	9	–	4,5	147	240	85
СХММ	12	–	7,5–8,0	140	30	92
ТХММ	3–4	–	9	93	30–45	95
ОПКО	7–10	–	9–12	130–140	30	90
Древесина лиственных пород						
ХТММ	0–3	4–6	12–13	120	2–5	88–92
ХММ	10–15	–	9–10	130–160	10–60	80–88
ХЩ	0–4	4–6	12–13	30–50	60–120	85–90

Таблица 14.25. Содержание ТММ и ХТММ в композиции различных видов бумаги и картона, %

Вид бумаги и картона	Вид механической массы		
	ТММ из древесины хвойных пород	ХТММ из древесины пород	
		хвойных	лиственных
Пушонка	–	80–100	–
Тонкие бумаги	–	20–40	20–40
Сплошной картон	20–40	20–40	20–40
Коробочный картон	20–25	25–35	15–20
Картон для упаковки жидких продуктов	–	20–25	15–20
Газетная бумага	95–100	80–100	70–80
Суперкаландрированная бумага (SC)	65–85	70–90	35–50

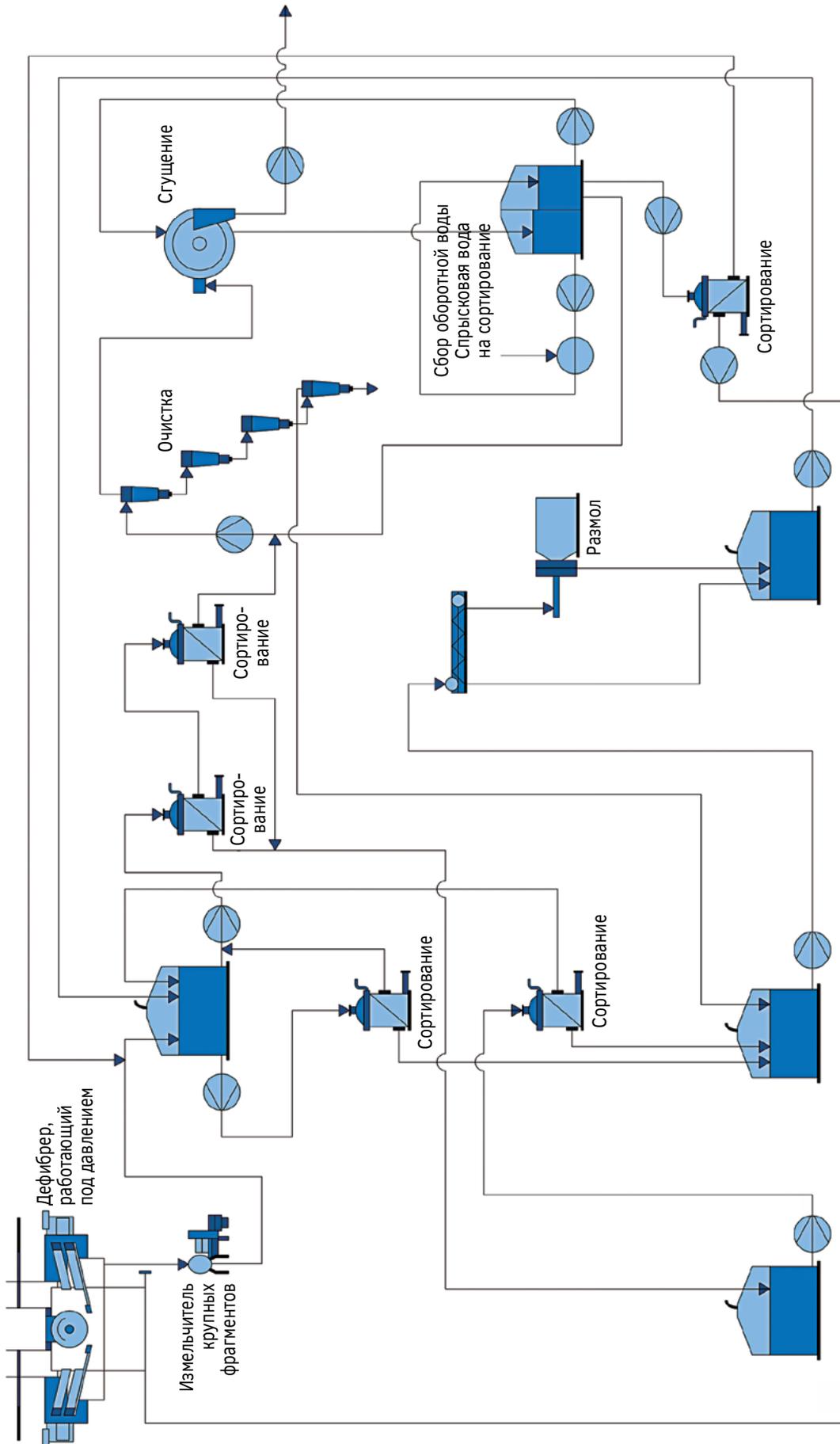


Рис. 14.13. Принципиальная технологическая схема производства ДМД-70

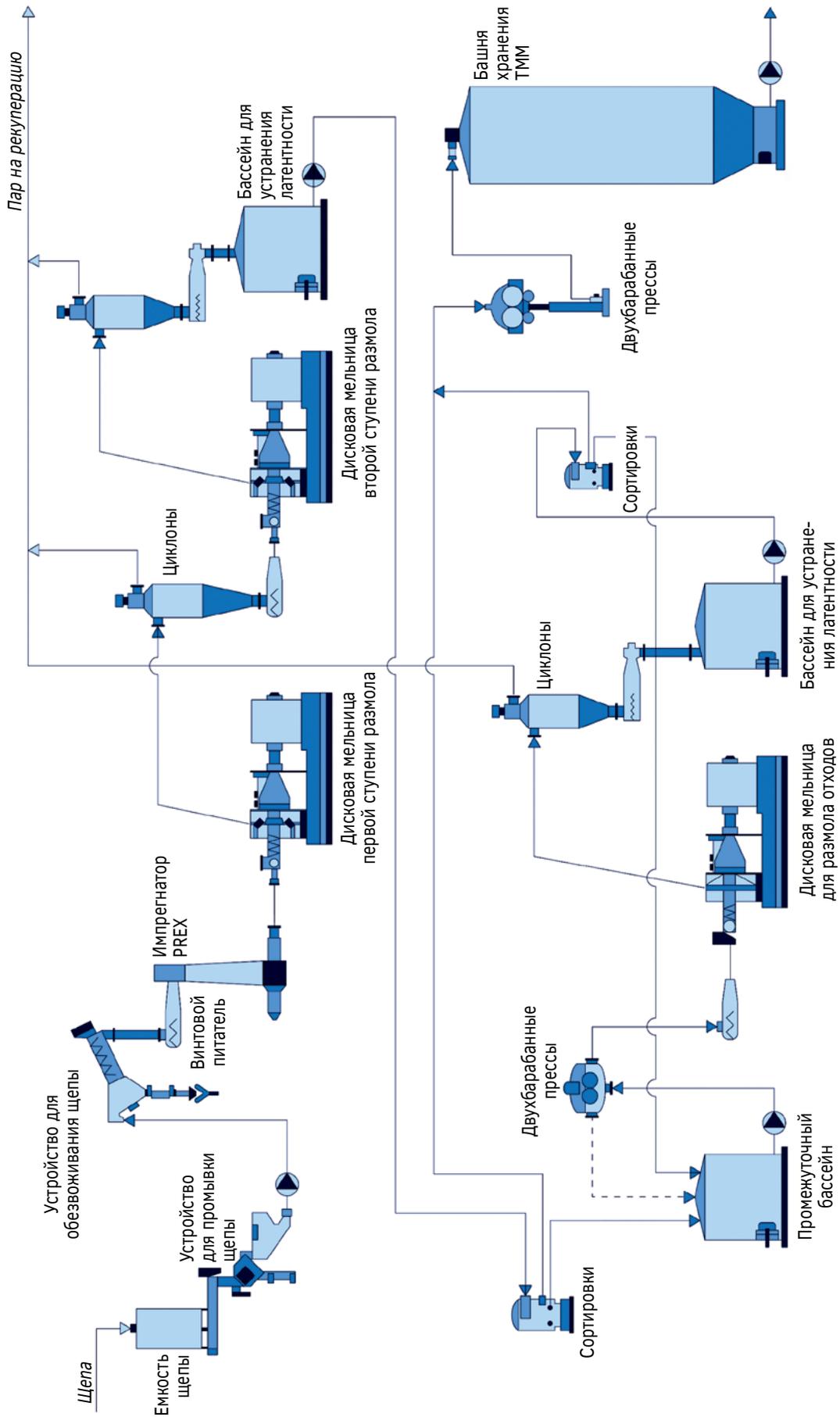


Рис. 14.14. Принципиальная технологическая схема установки для производства ТММ

Технологии производства технической целлюлозы

Строение древесины

Древесная ткань состоит из клеток, связанных между собой срединной пластинкой, содержащей лигнин. Слоистый каркас клетки образуют целлюлозные структуры — фибриллы (P — первичная стенка; S_1 , S_2 , S_3 — наружный, средний и внутренний слои вторичной клеточной стенки; L — люмен (внутренняя полость), а лигнин, гемицеллюлозы и пектин заполняют промежутки между ними (рис. 14.15).



Рис. 14.15. Слоистая структура клеточной стенки

Структура лигнина точно не установлена. В хвойной древесине ели 70% лигнина размещено между волокнами и 30% пронизывают слои клеточной стенки. Лигнин в лиственной древесине в основном находится в межклеточном веществе и в первичных слоях клеточной стенки.

Влияние способа варки древесины на целлюлозное волокно

Способ варки оказывает значительное влияние на состояние стенки целлюлозного волокна (рис. 14.16). В процессе *сульфатной* варки после растворения срединной пластинки древесная ткань распадается на отдельные сильно набухшие клетки, структура которых более рыхлая по направлению к люмену. В процессе *сульфитной* варки более рыхлая структура наблюдается со стороны первичной оболочки, чем со стороны люмена. Такое состояние стенки волокна определяет более легкую отбеливаемость сульфитной целлюлозы, чем сульфатной.

Влияние строения волокон на качество целлюлозы и бумаги

Длина волокна и толщина стенки древесного волокна оказывают существенное влияние на качество целлюлозы и древесной массы. Так, более длинные волокна дают более прочную целлюлозу и бумагу. Но тонкостенные волокна (осина) имеют свойство сплющиваться с образованием плотного полотна бумаги за счет большой площади межволоконных связей. Волокна с толстой клеточной стенкой (лиственница) мало сжимаются, и незначительная площадь контакта волокон образует пухлое полотно с пониженной прочностью. Благодаря фотодиодам и микропроцессору разработаны электронно-оптические анализаторы волокон,

что позволило в 2000-х гг. расширить фундаментальные основы качества технической целлюлозы и бумаги понятием «грубость волокна», которая определяется массой волокон, составляющих длину 1 м и выраженную в миллиграммах. Поскольку масса волокна равна массе клеточной стенки, соответственно, грубость зависит от толщины клеточной стенки. Это понятие дополнили «извитость волокон», «число (миллион) волокон в 1 г». Меньший диаметр волокна осины и низкая грубость создает плотный, прочный бумажный лист, даже при том, что длина волокна осины короче, чем у остальных древесных пород.

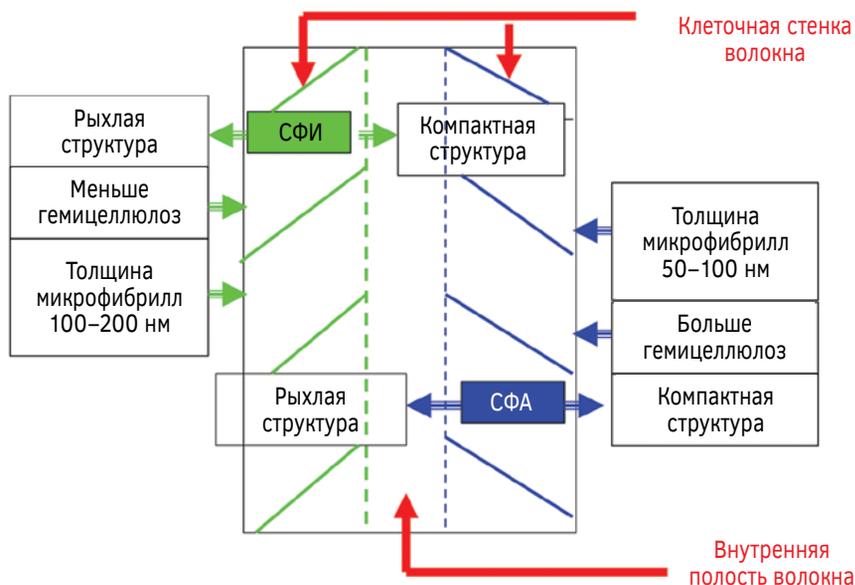


Рис. 14.16. Влияние способа варки на состояние стенки волокна технической целлюлозы, полученной по сульфитному и сульфатному способу варки

Производство сульфатной целлюлозы

В настоящее время 70% производимых волокнистых полуфабрикатов получают сульфатным методом. На рис. 14.17 представлена укрупненная схема производства сульфатной беленой целлюлозы. Рассмотрим отдельные звенья всей производственной цепи.

Прием и учет древесного сырья

Круглый лес поступает на площадку с корой, но учет древесины осуществляют в плотной мере и без коры, т. е. после измерения фактического объема, затем расчетным путем определяют объем древесины, который мысленно уложен без коры и промежутков в плотных метрах кубических (пл. м³). Аналогично рассчитывают объем щепы, уложенной без промежутков в пл. м³.

Предприятие, производящее, например, 500 тыс. т целлюлозы в год, принимает в течение года 2,5 млн м³ древесного сырья, что в денежном выражении составляет 2,5 млрд рублей. Ежедневно поступает 7,5 тыс. пл. м³ лесосырья в виде круглого леса и товарной щепы, которые доставляют сухопутным транспортом: автомобильным, железнодорожным и водным — в баржах. В случае поступления лесосырья только автомобильным транспортом в сутки нужно принять 150 автомашин, на которых требуется проверить объем и качество древесного сырья на соответствие сопроводительным документам. С начала 2000-х гг. эти процессы начали автоматизировать с использованием сканирующих устройств и приложений для расчета количества и качества лесосырья, в частности с использованием системы «Фотоскан».

Поступающее лесосырье частично складировать на площадке ~40 га или направляют непосредственно на производство щепы.

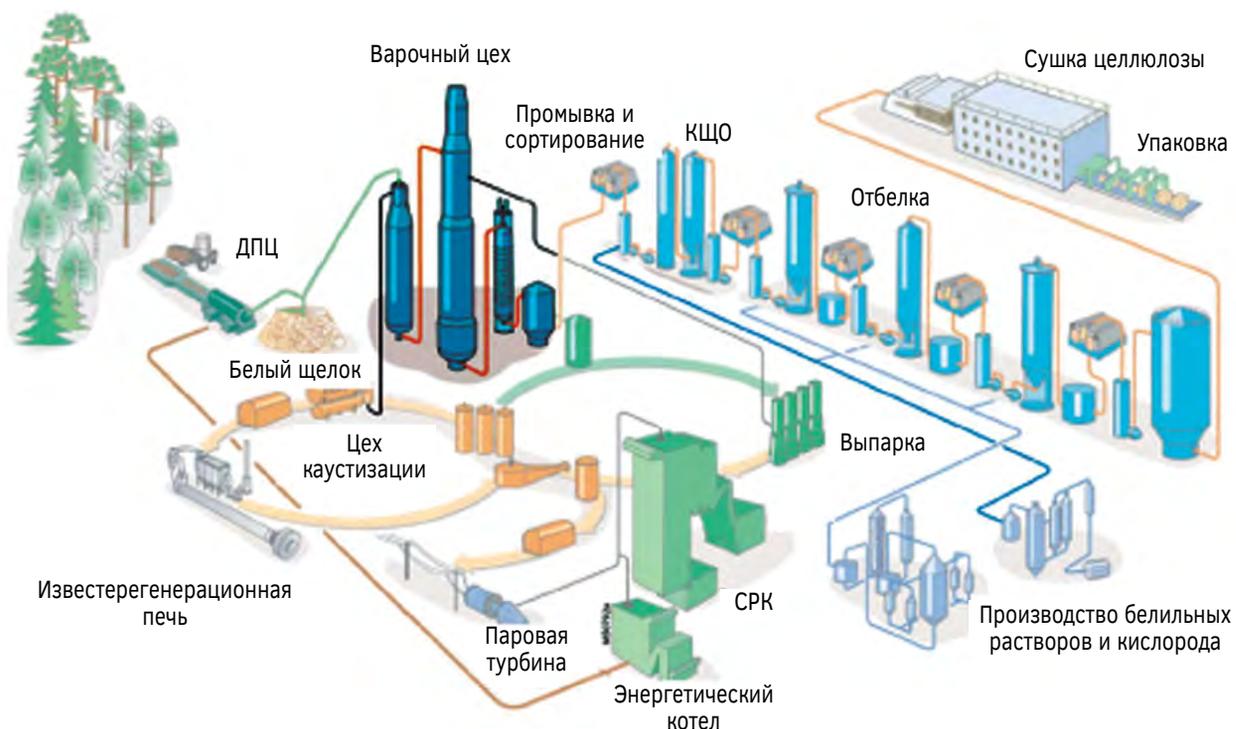


Рис. 14.17. Схема производства сульфатной беленой целлюлозы

Производство щепы

Поступившая древесина подвергается окорке (удалению коры с древесного ствола), рубке окоренного бревна в щепу, которая перед подачей в производство сортируется по размерам. Эти технологические операции проводят в древесно-подготовительном цехе (ДПЦ). В качестве примера бревна длиной 5–5,5 м доставляют в ДПЦ автомобильным транспортом и выгружают автопогрузчиками на крытый приемный транспортер длиной 50 м, на котором древесина в зимний период в течение 20 минут размораживается в теплой воде 45°С до температуры поверхности 0°С для удаления снега, минеральных включений и снижения адгезии коры к стволу, чтобы легче прошла окорка. Движение транспортера не вызывает трения бревен между собой, что предохраняет кору от повреждения и проникновения в нее влаги при ее размораживании, чем сохраняет теплотворную способность коры. Бревна поступают в окорочный односекционный барабан диаметром 5,6 м и длиной 36 м, установленный на гидроопорах, с частотой вращения барабана 5–7 об/мин. Масса барабана, заполненного древесиной, — 500 т. В барабане бревна поднимаются по направлению вращения барабана и, достигнув максимальной точки, скатываются вниз, истираясь друг о друга. Для отвода коры из барабана имеются продольные прорези, через которые она вываливается на транспортерную ленту и направляется на дополнительное измельчение в молотковой дробилке и обезвоживание на прессах. Снижение влажности КДО с 57 до 52% повышает теплотворную способность с 1385 до 1791 ккал/кг, или на 20%. Далее кору смешивают с различными древесными отходами и после подсушки сжигают в корьевом котле, например, с производительностью 130 т пара в час и давлением 6 МПа. Окоренные бревна поступают в рубительную машину с горизонтальной подачей бревна и нижней выгрузкой щепы, обеспечивающей требуемую длину щепы и ее сохранность от дробления на «спички». Часть полученной щепы направляют на кучевое хранение, а часть — в отдел сортирования на геликоидальные сортировальные машины. Суммарные потери годной древесины при подготовке щепы из хвойных пород — 2,6% и из лиственных пород — 3,2%. Сортированную щепу направляют ленточным транспортером в варочный котел. Использование данной технологии соответствует НДТ и обеспечивает минимальные потери белой древесины вместе с корой,

равномерную по толщине и длине щепу, которые важны при диффузионном характере варочного процесса для равномерной делигнификации каждой щепки и всего столба щепы в варочном котле. Длинная щепка не забивает сита в варочной зоне котла, что стабилизирует процесс варки за счет беспрепятственной циркуляции щелока.

Сульфатная варка целлюлозы для бумаги

Цель — растворить инкрустирующие вещества древесины щепы (лигнин) в щелочном варочном растворе (смесь гидроксида натрия и сульфата натрия) и максимально сохранить целлюлозу и гемицеллюлозы, чтобы получить массу волокон с оптимальным содержанием остаточного лигнина для последующей менее затратной отбеливки целлюлозы. Остаточный лигнин определяется показателем числа Каппа, в нашем случае для хвойной целлюлозы число Каппа 33.

На рис. 14.17 представлен цех для непрерывной варки целлюлозы по технологии COMPACT COOKING™, представляющий систему двух сосудов. Первый сосуд — пропиточный бункер, второй — варочный котел. Щепу по транспортеру подают в пропиточный бункер. Цель пропитки — вытеснить воздух из щепы, чтобы обеспечить в процессе варки беспрепятственную диффузию варочного раствора в объеме щепки. Для пропитки щепы по центральной трубе бункера подают смесь охлажденного белого и черного щелока, который поступает из варочного котла. Пропитку осуществляют в мягких условиях при низкой температуре и атмосферном давлении. Потом для удаления воздуха подают горячий щелок и щепу нагревают до 100°С. Пропаренная и пропитанная щелоком щепка специальным разгрузочным устройством выгружается из бункера и подается в питатель высокого давления, который перемещает щепу из пропиточной камеры (атмосферное давление) во второй сосуд — варочный котел с избыточным давлением. Щепка транспортируется щелоком с помощью насоса щепы. В варочном котле образуется столб щепы,двигающийся по высоте котла со скоростью 12–15 м/час. В котел подают свежий варочный щелок, называемый белым щелоком, поступающим из цеха каустизации и регенерации извести (ЦКРИ). Соотношение древесина — раствор (жидкостной модуль) составляет 1 : 3, или 3 м³ варочного щелока на 1 т абсолютно сухой древесины щепы. Расход гидроксида натрия для хвойной древесины (сосна) составляет 19,5–22% к массе абсолютно сухой древесины в единицах NaOH или 15–17% в ед. Na₂O (ед. Na₂O = ед. NaOH × 0,775; ед. NaOH = ед. Na₂O × 1,29). Расход сульфида натрия выражают в единицах сульфидности, которая представляет собой отношение массы сульфида натрия к суммарной массе гидроксида и сульфида натрия (расчет ведут в эквивалентных единицах), выраженное в процентах. Обычно сульфидность белого щелока поддерживают на уровне 27–30%. Варку проводят при температуре 150–160°С и давлении 0,7–1,2 МПа в течение 4–5 ч. В варочном котле имеются три зоны: верхняя и нижняя варочные зоны, а также зона диффузионной промывки. В верхнем сепараторе варочного котла поступающая щепка отделяется от транспортирующего щелока. Острый пар подают в верхнюю часть варочного котла, что обеспечивает нагрев щепы до требуемой температуры варки и равномерное распределение температуры во всем объеме варочного котла. Варка протекает по ходу движения столба щепы в котле (прямоточный режим) по всей высоте варочного котла за исключением зоны промывки. Для поддержания требуемой температуры варки и концентрации щелочи по высоте котла в теле корпуса имеются сита, через которые отбирают черный щелок и направляют для нагрева в теплообменники, и уже в нагретый черный щелок, если необходимо, добавляют белый и возвращают в центральную трубу варочного котла, из которой он распределяется по сечению котла от центра к периферии. Таким образом осуществляют циркуляцию щелока, кратность которой составляет 5–10, т. е. весь щелок, сопровождающий движение столба щепы сверху вниз, проходит через подогреватели-теплообменники 5–10 раз. Промывку сваренной массы в котле осуществляют в его нижней части движением промывной жидкости навстречу столбу массы. В качестве промывной жидкости используют фильтрат от промывки сваренной целлюлозы в промывном

диффузоре. Целлюлоза выгружается из варочного котла с помощью разгрузочного устройства в промывной диффузор под давлением при концентрации массы 10–12%. Из варочного котла отбирают черный щелок в количестве 10 м³/т.

Очистка щелока от скипидара

Отобранный из котла черный щелок поступает в расширительный циклон, в котором перепад с избыточного давления до атмосферного образует пары вскипания черного щелока, которые далее поступают в циклон, чтобы отделить из парогазов капли унесенного черного щелока и волокна массы. Очищенные парогазы поступают на двухступенчатую очистку от скипидара в специальных теплообменниках. На первой ступени конденсации образуется ~300 л терпентинного конденсата на 1 т целлюлозы с температурой 60–70°С (наиболее благоприятная температура) и поступает в бак терпентинного конденсата, из которого его откачивают в декантатор. В декантаторе скипидар, благодаря низкой плотности (плотность 0,860 кг/дм³), всплывает над поверхностью подскипидарной воды, и, таким образом, его выделяют в виде скипидара-сырца — товарного продукта в количестве 1,5–2 кг скипидара на 1 т целлюлозы при непрерывном процессе варки, а вода (без содержания скипидара) направляется на линию обработки грязного конденсата или сбрасывается в канализационную систему. Отходящие с первой ступени конденсации неконденсированные газы являются высококонцентрированными дурнопахнущими газами (ВК ДПГ), и их направляют на вторую ступень очистки от скипидара — терпентинный скруббер, орошаемый циркуляционной водой, для дополнительной конденсации оставшегося скипидара и его отделения перед подачей неконденсируемых газов на сжигание. Полученный конденсат отправляют на отделение скипидара от подскипидарной воды. Это соответствует НДТ для обеспечения безопасности всего сульфатцеллюлозного производства, поскольку неотобранный скипидар может накапливаться в углублениях трассировки трубопроводов выпарной установки, а также в канализационной системе. В результате возникает угроза взрыва в процессе технического обслуживания трубопроводов, когда последние опорожняются и в них проникает воздух. Транспортировка ВК ДПГ осуществляется паровым эжектором.

Сортирование целлюлозы

Сортирование небеленой целлюлозы осуществляется обычно на сортировках в четыре ступени. Цель сортирования — удалить из массы сучки и непровар (грубое сортирование), которые способны вывести из строя оборудование, применяемое на последующих стадиях тонкого сортирования, и прессовое оборудование для промывки массы. Узелки волокон удаляют на стадии тонкого сортирования. Сортирование производят в центробежных сортировках. Внутри закрытого цилиндрического корпуса установлен вал со специальными лопастями, между ротором и корпусом установлен ситовой барабан с круглой или щелевой перфорацией. Масса поступает в центр сортировки и лопастями отбрасывается на барабан с перфорацией. Годная масса проходит через перфорацию и направляется в поток отсортированного волокна. Крупные частицы, задержанные перфорацией, поступают на следующую ступень сортирования, из которой хорошее волокно направляют на сортировку первой ступени. Отходы сортирования подают для дополнительного отжима до сухости 30% на винтовой пресс и периодически вывозят на склад кородревесных отходов для сжигания в корьевых котлах или при необходимости вновь направляют в варочный котел. Кондиционная целлюлоза от сортировок 1-й ступени подается на двухступенчатую установку из промывных прессов.

Промывка целлюлозы

Цель процесса промывки — наиболее полное извлечение растворенных веществ из массы целлюлозы при минимально возможном расходе промывной жидкости. При промывке сваренной целлюлозы и после кислородно-щелочной делигнификации (КЩД) отделяется отработанный щелок, что является первым этапом процесса регенерации щелочи, затраченной

на варку и КЩД. Кроме того, органическая часть растворенных веществ служит топливом для получения тепловой и электрической энергии. Минимальные затраты промывной жидкости, минимальная продолжительность процесса и отбор более концентрированного раствора щелока для последующего выпаривания определяют экономичность процесса промывки и цикла регенерации химикатов. Цель промывки в отбелке — минимизировать перенос загрязняющих веществ с массой на следующую стадию отбелки, что экономит расход отбеливающих реагентов.

Промывной пресс состоит из закрытой ванны, над которой установлены два отжимных барабана с отверстиями, покрытые сеткой. Масса с концентрацией 7% насосом подается в ванну, из которой под давлением проходит между двумя вращающимися в разные стороны барабанами и отжимается между ними до концентрации 30–35%. Отжатый фильтрат, содержащий остатки щелочи и органических веществ, поступает в барабаны и отводится. Далее, в приемном устройстве масса разбавляется до концентрации 7% и подается на отжим в пресс на вторую ступень промывки. Таким образом, отделение остатков черного щелока проводится за счет последовательных операций сгущения / разбавления массы.

Кислородно-щелочная делигнификация

Цель КЩД — дополнительно снизить степень делигнификации перед отбелкой с 33 единиц Каппа до 21 единицы Каппа, или на 64% для хвойной целлюлозы при использовании двухступенчатой кислородно-щелочной делигнификации. По приблизительной оценке снижение содержания остаточного лигнина на КЩД происходит с 48 кг/т до 18 кг/т, соответственно, 30 кг/т остаточного лигнина из отбельного цеха не попадает на очистные сооружения, а вместе с черным щелоком сжигается в СРК. За счет этого сокращают расход химических реагентов в отбельном цехе. Это техническое решение соответствует НТД.

Промытая масса поступает на двухступенчатую кислородно-щелочную делигнификацию при средней концентрации массы 12% с использованием двух реакторов с восходящим потоком. Перед 1-й ступенью осуществляется смешение целлюлозной массы сначала с окисленным белым щелоком для создания требуемой щелочности, а затем в специальном смесителе с кислородом, который создает турбулентный режим течения суспензии, что обеспечивает диспергирование газообразного кислорода и его однородное распределение в жидкости, окружающей единичное волокно. На первой ступени кислородная делигнификация осуществляется в реакторе при высоком давлении (0,8 МПа) и низкой температуре (85°С) в течение 30 минут. Масса из реактора 1-й ступени через смеситель с паром и кислородом подается в реактор 2-й ступени (щелочные реагенты на 2-ю ступень не подаются). Вторая ступень кислородной делигнификации проводится в реакторе при низком давлении (0,4 МПа) и высокой температуре (100°С) в течение 60 минут. Такое проведение процесса на первой стадии КЩД соответствует лучшему проникновению реагентов внутрь стенки волокна, а вторая ступень — проведению химической реакции в стенке волокна и диффузии продуктов реакции к его поверхности.

Целлюлозную массу выгружают из реактора и направляют в выдувной резервуар, из которого она поступает на промывку. В процессе промывки удаляют отработанную щелочь и органические вещества, растворившиеся на стадии кислородной делигнификации. Промывка после кислородной делигнификации проводится последовательно на двух прессах. Полученный промывной щелок КЩД смешивают с черным варочным щелоком и направляют в систему регенерации химикатов сначала на выпарку, а потом на сжигание в СРК. Таким образом, от ступени КЩД нет сброса щелоков на очистные сооружения, что соответствует НДТ.

Отбелка сульфатной целлюлозы

Цель отбелки — повысить белизну целлюлозы с 35 до 83–88% за счет удаления из волокна остатков окрашенных инкрустирующих веществ. Промытая масса после двухступенчатой кислородно-щелочной делигнификации поступает на отбелку по схеме D_0 — ШО — D_1 — К,

где D_0 — отбелка диоксидом хлора (0 обозначает отсутствие добавки хлора); ШО — щелочение с кислородом; D_1 — отбелка диоксидом хлора, первая ступень; К — кисловка массы водным раствором SO_2 . Чередование кислых и щелочных ступеней в схемах отбелки связано с окислением остаточного лигнина на кислотной ступени диоксида хлора и растворением продуктов реакции на щелочной стадии. Удаление растворенных веществ производят на стадии промывки.

Диоксид хлора используется для отбелки в виде водного раствора ClO_2 с концентрацией 5–7 г/дм³, вполне взрывобезопасен и наиболее устойчив в кислой среде. При реакциях окисления он выделяет 2,5 эквивалента кислорода на 1 моль. Поскольку молекулярная масса ClO_2 равна 67,5, а хлора — 71, то в пересчете на активный хлор 1 г ClO_2 по своей окислительной способности эквивалентен 2,63 г Cl_2 ($(2,5 \cdot 71) / 67,5$). Повышенная окислительная способность диоксида хлора способствует образованию в основном низкомолекулярных продуктов реакции и меньшим содержанием атомов хлора в молекуле по сравнению с высокомолекулярными хлорорганическими веществами, образующимися при реакции с хлором. Это существенно влияет на степень их биологической очистки. Так, для фильтратов от отбелки хлором она составляет 30–35%, а для фильтратов от отбелки диоксидом хлора — 75–80%. Поэтому исключение хлора является главной природоохранной задачей отбелки целлюлозы.

Ступень D_0 проводится при pH 3,0–3,5 в башне с восходящим потоком и в колонке с нисходящим потоком при температуре 75°С в течение 60 минут. Массу после ступени D_0 промывают на прессе. Промытая масса поступает на ступень ШО, которую проводят при pH 10,5–11,0 в реакторе с восходящим потоком при температуре 75°С. Время пребывания массы на ступени ШО — 75 минут, затем промытая на прессе масса поступает на ступень D_1 . Ступень отбелки D_1 проводят при pH 3,5–4,0 в башне с восходящим потоком и в колонке с нисходящим потоком при температуре 75°С в течение 120 минут. Промывку массы проводят на прессе горячей водой. После промывки в массу добавляют 2–3 кг $SO_2(100\%)$ /т в. с. ц. и кисловку массы проводят в башне хранения. Назначение кисловки — стабилизация белизны целлюлозы за счет более полного удаления окрашенных продуктов и металлов переменной валентности.

Сушка, резка и упаковка целлюлозы

Отбеленная целлюлоза жидким потоком поступает на производство бумаги (интегрированное предприятие) или на сушильную машину для получения товарной целлюлозы, предназначенной сторонним потребителям. Сушильная машина состоит из двух частей — мокрой части (сеточная и прессовая) и сушильной части (цилиндровая или воздушная). Целлюлозная суспензия отливается и обезвоживается на сеточном столе до сухости непрерывного целлюлозного полотна 23% и поступает в прессовую часть, в которой полотно отжимается на нескольких прессах и его сухость составляет 50–55%. Далее полотно поступает в сушильную часть, в которой происходит сушка полотна до 10–15% влажности на сушильных цилиндрах или воздухом в сушильном шкафу. После сушки полотно охлаждают на холодильных цилиндрах и подают на продольно-резательный станок для резки на рулоны или на саморезку для разрезания на листы форматом 800 x 600 мм, обеспечивающие максимальную загрузку транспортного контейнера. Кипа целлюлозных листов автоматически взвешивается, затем прессуется до определенной высоты. Далее она упаковывается в бумагу и обертывается проволокой.

Система регенерации химикатов сульфатцеллюлозного производства

Регенерация химикатов черного щелока включает следующие производственные процессы: упаривание щелока на выпарной станции до содержания в нем 47–52% абсолютно сухого вещества (а. с. в.); концентрирование черного щелока на концентраторах до 67% а. с. в. и на суперконцентраторах до 85%; сжигание упаренного щелока с получением минерального остатка — плава, растворением которого получают зеленый щелок (раствор

плава); каустизации зеленого щелока гашеной известью для перевода карбоната в гидроксид натрия. Так в производстве сульфатной целлюлозы происходит непрерывный кругооборот химических реагентов.

Выпаривание черного щелока

Процесс выпарки черного щелока осуществляют с целью удаления избыточной влаги, поскольку для правильной организации процесса сжигания крепкого черного щелока в СРК необходима массовая доля сухих веществ не менее 57%. Однако для увеличения производительности СРК и уменьшения загрязненности его газовых выбросов содержание сухих веществ оптимально на уровне 85%. Технологический процесс на стадии выпарки состоит из следующих операций: подготовка слабого черного щелока (удаление мелкого волокна и сульфатного мыла); выпаривание щелока на вакуум-выпарной станции и концентрирование плотного щелока на супер концентраторах.

Подготовка слабого черного щелока

Для улавливания волокна из черного щелока используют, например, его фильтрацию в две ступени. На первой ступени фильтруют щелок на напорных фильтрах «Andritz», на второй ступени для дополнительной очистки используют фильтры «Малоне». Содержание волокна не должно превышать 10 мг/дм³.

В процессе сульфатной варки щелочные реагенты варочного щелока омыляют содержащиеся в древесине смоляные и жирные кислоты, которые переходят в черный щелок в виде натриевых солей и вместе с нейтральными веществами образуют сульфатное мыло в черном щелоке от варки хвойных и лиственных пород. Удаление сульфатного мыла из щелока осуществляют отстаиванием в емкостях питательного щелока с объемом баков на 16–20 часов работы. За счет разницы в плотности веществ сульфатного мыла 0,95–0,98 г/см³ и питательного щелока 1,075–1,100 г/см³ (при 15°С) происходит их разделение и сульфатное мыло собирается в верхнем слое. Важно подчеркнуть, что их расслоение происходит благодаря коагуляции частиц мыла (высаливание мыла), происходящей под действием электролитов щелока, коагуляция превращает коллоидный раствор в расслаивающуюся эмульсию. Точка минимальной растворимости сульфатного мыла в черном щелоке находится при содержании остаточной эффективной щелочи 7,0–8,0 г Na₂O/дм³. Съем сульфатного мыла необходим для поддержания оптимальной работы выпарных станций, чтобы на теплопередающих поверхностях не происходили его отложения и, кроме того, сульфатное мыло — ценное сырье для дальнейшей переработки или для использования в качестве собственного высококалорийного топлива. Смоляные кислоты — высокотоксичные вещества, поэтому их отбор должен быть максимально полным, чтобы исключить попадание этих веществ в окружающую среду. Поддержанию производительности СРК при сжигании сухих веществ черного щелока способствует удаление сульфатного мыла, поскольку его теплотворная способность в два раза больше сухих веществ щелока. Таким образом, эффективность сульфатцеллюлозного производства определяется в том числе и более полным съемом веществ сульфатного мыла.

Выпаривание щелока на вакуум-выпарной станции, концентраторах и суперконцентраторах

Для выпарки сульфатных щелоков применяют вертикальные выпарные аппараты с падающей пленкой. В составе цельносварного аппарата — кипятильник, расположен наверху, под ним кипяточные трубки и внизу — сепаратор. Щелок подают в верхнюю щелоковую камеру, и он стекает пленкой вниз по стенкам кипяточных трубок, подгоняемой образующимся паром. Греющий пар вводится в верхний уровень трубок, конденсат удаляется снизу. Вторичный пар удаляется в сепараторе с помощью решетки и отводится из аппарата. Аппараты пленочного типа работают в составе 5–7 корпусных батарей с паропроизводительностью от 12 до 22 кг/(м²·ч). Производительность станции определяет размеры выпарных аппаратов,

соотношение объемов кипяtilьных камер и сепараторов. Питание батареи может происходить по смешанной системе при последовательности работы корпусов IV — V — VI — III — II — I и параллельной работы концентраторов. Первый корпус батареи и концентраторы обогреваются свежим паром. Основные производственно-технические показатели: удельный расход пара на 1 кг испаренной воды (5 корпусов 0,25–0,28); 6 корпусов — 0,21–0,24; 7 корпусов — 0,18–0,20) на 1 т целлюлозы (жесткая — 1,1–1,7 т; среднежесткая, белая — 1,2–2 т). Для выпаривания щелока до более высоких концентраций содержания сухих веществ 60–65% применяют концентраторы, обогреваемые свежим паром. Они последними входят в состав батареи (по ходу щелока). Финская фирма «Розенлев» установила первый суперконцентратор с падающей пленкой на заводе «Айтталуото» в 1986 г. Суперконцентратор упаривал исходный щелок после выпарной станции с концентрацией 60–65 до 75–80% сухих веществ. Черный щелок (смесь черного щелока с сульфатом натрия, добавляемым для возмещения потерь щелочи и серы) подают в нижнюю камеру. Центробежным насосом из нижней камеры щелок подают в верхнюю камеру. Помимо этого, часть щелока поднимается вверх по центральной циркуляционной трубе большого сечения благодаря свободной конвекции. Обогрев суперконцентратора осуществляют свежим греющим паром давлением 1 МПа и температурой 180°С. Это обеспечивает температуру кипящего щелока порядка 170°С. Высокая температура снижает вязкость высококонцентрированного щелока, что позволяет его перекачивать центробежным насосом. В настоящее время достигается содержание сухих веществ более 85%.

Сжигание черного сульфатного щелока

В 1930-е гг. Г. Х. Томлинсон разработал первый в мире содорегенерационный котлоагрегат (СРК), в топке которого в процессе сжигания сгущенного черного щелока регенерируется затраченная на варку щелочь, а сульфат натрия восстанавливается до сульфида натрия и производится тепловая энергия. Первый СРК сжигал 120 т абсолютно сухих веществ в сутки (а. с. в./сут) и послужил широкому применению в мире сульфатного способа варки целлюлозы. Сегодня СРК достигает производительности 8000 т а. с. в./сут (высота топки 86 м, площадь пода 323 м², общая длина труб нагревательных поверхностей в этом СРК 500 км). СРК — самое дорогостоящее оборудование сульфатцеллюлозного завода.

Сульфатный черный щелок рассматривают как влажное, высокозольное и низкокалорийное топливо, поскольку теплотворная способность сухих веществ черного щелока низкая и находится в пределах 15,1–16,0 МДж/кг. Предварительно нагретый концентрированный черный щелок распыляется в топку СРК с помощью нескольких форсунок, в которых струя щелока дробится на капли 2–5 мм. Небольшой размер обеспечит за 1,5 секунды протекание трех стадий сжигания капли: сушка, удаление летучих компонентов и сжигание углерода до попадания углерода в плав. Углерод, попадая в плав, играет важную роль в восстановлении сульфата натрия (Na₂SO₄) до сульфида натрия (Na₂S) по реакции $Na_2SO_4 + 2C = Na_2S + 2CO_2$. Сульфид натрия — активный химический реагент, используемый совместно с едким натром (NaOH) в процессе варки. В расплаве на поду котла также происходят реакции термоокисления с образованием карбоната натрия (Na₂CO₃) и сульфата натрия (Na₂SO₄) по реакциям $2NaOH + CO_2 = Na_2CO_3 + H_2O$ и $Na_2S + CO_2 + H_2O = Na_2CO_3 + H_2S$, а также регенерация серы по реакции $2SO_2 + O_2 + 2Na_2CO_3 = 2Na_2SO_4 + 2CO_2$. Для сжигания выделяющихся из огарка горючих газов в топку котла вентилятором подают вторичный и третичный воздух (обозначают уровень подачи по высоте котла). Степень восстановления определяют величиной превращения сульфата натрия в сульфид, которая обычно составляет 90 до 92%. И рассчитывают следующим образом:

$$\text{Степень восстановления (\%)} = 100 \times \frac{[Na_2S]}{[Na_2S] + [Na_2SO_4] + [Na_2SO_3] + [Na_2S_2O_3]}$$

Вышеуказанная концентрация химических веществ в квадратных скобках приводится в единицах Na_2O .

Для восполнения потерь серы и щелочи перед сжиганием в черный щелок дополнительно вводят требуемое количество сульфата натрия.

Было установлено, что при сжигании в топке СРК более концентрированного черного щелока или за счет снижения влажности щелока улучшают условия его горения и уменьшают количество дымовых газов, содержащих диоксид серы и сероводород, увеличивают производительность СРК по сжигаемому щелоку и сокращают потери серы в цикле регенерации. Эта технология отвечает НДТ.

Образующийся на поде топки плав солей, например, массой ~ 530 кг (из расчета на 1 т целлюлозы) состоит в основном из Na_2CO_3 (72–73%), Na_2S (15–24%), Na_2SO_4 и других соединений (2–4%). Полученный расплав солей стекает с пода котла через летку, охлаждаемую водой, в бак растворителя плава, в котором его растворяют в слабом белом щелоке из цеха каустизации и получают зеленый щелок. Для разбивания струи плава используют пар. Имеется вытяжная труба для отвода образовавшихся парогазов, которые направляют на сжигание.

Каустизация зеленого щелока

Цель каустизации — перевод неактивной формы щелочи Na_2CO_3 в активную NaOH за счет реакции: $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + 2\text{NaOH}$.

Начало процесса каустизации — гашение извести в гасителях-классификаторах. Питателем (тарельчатым или роторным) подают дозированное количество негашеной извести с расчетом обеспечить степень каустизации 78–82%, а из баков-накопителей поступает предварительно подогретый до температуры 78–82°С осветленный зеленый щелок при концентрации 105–130 г/дм³ в единицах Na_2O . В гасителе-классификаторе пребывание извести составляет 20–25 минут, и происходит первичное гашение извести, удаление из реакционной смеси непрореагировавших кусков извести и посторонних минеральных включений. Степень каустизации зеленого щелока из гасителя-классификатора I составляет 60–65%. Процесс каустизации завершается в последовательно установленных трех-четырех каустизаторах в течение 100–120 минут с распределением температуры по корпусам: каустизатор I — 90–92°С; II — 94–96°С; III — 96–98°С. Для поддержания требуемого температурного режима подают острый пар 0,36–0,4 МПа с расходом 0,15 т/т целлюлозы. Рациональное проведение процесса способствует образованию крупнокристаллической взвеси, которая имеет требуемую скорость последующего осаждения каустизационного шлама в осветлителях, и получению белого щелока с минимальным содержанием взвешенных веществ. Из последнего каустизатора известково-щелочная смесь поступает на многоярусные отстойники или вакуум-фильтры. Для ускорения осветления используют добавку полиакриламида или дополнительную фильтрацию через патронные фильтры. После осветления белый щелок с содержанием взвешенных веществ не более 30 мг/куб. дм подают в варочный цех.

Регенерация извести

Каустизационный шлам концентрацией 35–40% из последнего промывателя откачивают в баки-накопители, установленные перед вакуум-фильтрами, для промывки шлама. В баках-накопителях с мешалкой для лучшего перемешивания шлама подают воздух. Каустизационный шлам с сухостью 40% (плотность 1,36 г/см³) содержит в 1 м³ 520 кг а. с. CaCO_3 подают на вакуум-фильтр. В зоне фильтрации на сетке происходит отекание жидкости и на сетке образуется шлам осадка. В зоне обезвоживания осадка происходит дальнейшее обезвоживание за счет просасывания воздуха и осадок уплотняется, вследствие чего скорость обезвоживания падает. В зоне промывки осадка применяют горячую воду с расходом 1–2 м³ на 1 т осадка, далее проводят обезвоживание промытого осадка и промытый осадок с остаточной щелочностью не выше 0,5–0,75% Na_2O удаляют с сетки сжатым воздухом.

Фильтрат от промывки шлама в виде слабого белого щелока направляют на растворение плава СРК для получения зеленого щелока.

Из баков-накопителей промытый шлам сухостью 75% винтовыми конвейерами подают в известерегенерационную печь (ИРП). Повышение концентрации шлама с 60 до 75% позволяет экономить 35% топлива. Одновременно из бункера свежего известняка дисковым дозатором к шламу добавляют 10–15% свежего известняка от общего количества извести, поступающей в печь для компенсации потерь CaO. Материал подается в холодный конец печи, на противоположном горячем конце печи установлена горелка, которая подогревает печь с расходом условного топлива 35–50 кг/т в. с. ц. Движение материала в печи происходит за счет вращения и уклона, составляющего в градусах и минутах $1^{\circ} 43' - 2^{\circ}$. Поступивший в печь вязкий материал продвигается в зону цепей с помощью направляющих. Цепные завесы выполнены по трехзаходному винту с углом 60° относительно оси печи. Подсушенный и разбитый на куски шлам ускоряет движение вперед. На последнем участке цепной завесы происходит гранулирование материала. В зонах нагрева обжига и охлаждения гранулированный материал продвигается только за счет уклона печи. Средняя скорость движения материала в открытой части печи — 0,006–0,012 м/с и зависит от скорости вращения печи. Окончательное охлаждение проводят в известеохладителе. Продолжительность пребывания в печи — 2,5–4 часа. Охлажденную известь скребковым конвейером подают на классификатор, где отделяют гранулы более 30 мм, которые передают на дробление. Подготовленная известь передается в бункеры для использования в гасителе-классификаторе.

Производство сульфитной целлюлозы

Сульфитная целлюлоза представляет собой волокнистый материал, полученный при химической обработке древесины водными растворами солей сернистой кислоты (H_2SO_3), называемыми сульфитными варочными растворами. Кроме этого, водные растворы солей сернистой кислоты используются в качестве реакционной среды при производстве полуцеллюлозы и древесной массы. Доля сульфитной целлюлозы в общемировом производстве волокнистых полуфабрикатов из растительного сырья в 2000 г. составила всего 5%.

Получение целлюлозы осуществляют обработкой щепы варочной кислотой в котлах при температуре 130–170°С (в зависимости от pH) и давлении 0,6–1,0 МПа и включает операции по регенерации диоксида серы и промывке сваренной целлюлозной массы.

На отечественных предприятиях нет регенерации отработанных варочных сульфитных растворов и проводят их частичную очистку за счет биохимической переработки щелоков с получением этанола, кормовых дрожжей и товарных лигносульфонатов.

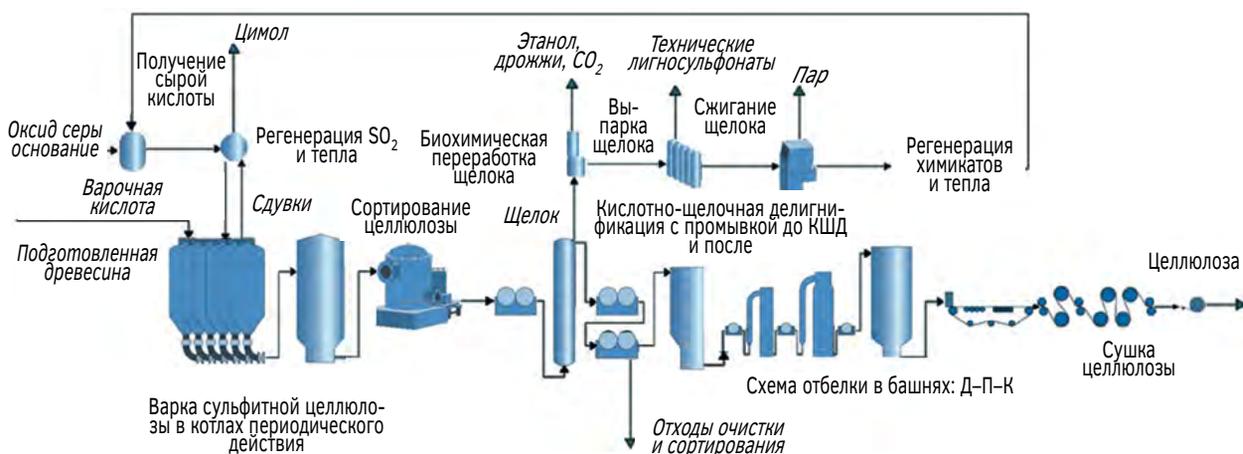


Рис. 14.18. Принципиальная схема производства сульфитной целлюлозы

Переработка сульфитных щелоков

В сульфитном щелоке содержится около 50% органических веществ, считая от массы исходной древесины. Кроме органических соединений в нем присутствуют неизрасходованная сернистая кислота и ее соли, а также другие сернистые соединения. Групповой состав органических веществ сульфитного щелока приведен в табл. 14.26.

Таблица 14.26. Состав органических веществ сульфитного щелока, % от СВ

Компоненты	Сульфитная варка		Бисульфитная варка		Моносульфитная варка
	хвойных	лиственных	хвойных	лиственных	лиственных
Лигносульфонаты	55–60	30–37	65–66	55–56	45–49
Углеводы (по РВ)	28–32	38–42	16–17	17–19	12–14
Органические кислоты	11–12	23–26	16–18	24–25	36–38
Экстрактивные вещества	1	2	1	2	3

Лигносульфонаты представляют собой соли лигносульфоновых кислот, образующиеся в результате сульфирования лигнина. Они имеют сложное, окончательно не установленное строение; их молекулярная масса лежит в пределах 2000–100 000. На одну метоксильную группу приходится 0,5–1,0 сульфогрупп.

Углеводы сульфитного щелока состоят в основном из моносахаридов (табл. 14.27) с небольшим содержанием олигосахаридов. В отработанных щелоках после бисульфитной и моносульфитной варки углеводы находятся в виде олигомеров и полимеров.

Таблица 14.27. Относительный состав моносахаридов сульфитных щелоков (после инверсии), %

Соединение	Сульфитная варка		Бисульфитная варка хвойных	Моносульфитная варка лиственных
	хвойных	лиственных		
Манноза	48	3	50	2
Ксилоза	22	80	19	82
Галактоза	10	2	11	5
Глюкоза	9	10	15	4
Арабиноза	6	3	3	5
Рамноза	5	2	2	2

В ходе варки образуются летучие кислоты (муравьиная и уксусная кислоты), с преобладанием уксусной кислоты (85–92%). При варке еловой древесины выход летучих кислот составляет 20 кг/т, а при варке березы — около 70 кг/т в расчете на исходную древесину.

Основная масса нелетучих кислот имеют углеводную природу и представлены альдоновыми, уроновыми и углеводсульфоновыми кислотами.

Кроме названных соединений, в щелоке присутствуют карбонильные соединения (фурфурол, 5-метилфурфурол, формальдегид), негативно влияющие на биохимическую утилизацию органических веществ.

Подготовка щелока к биохимической переработке

Общая технологическая схема подготовки щелока к биохимической переработке обычно включает следующие операции: 1) фильтрация щелока от целлюлозного волокна; 2) десульфитация и удаление летучих веществ; 3) окисление сульфитов и фенолов; 4) нейтрализация; 5) введение питательных веществ; 6) осветление и охлаждение.

Получение технических лигносульфонатов

Технические лигносульфонаты получают концентрированием растворов после стадии получения этанола (сульфитно-спиртовая бражка) или дрожжей (сульфитно-дрожжевая) бражка. Сухой остаток (6–9%) сульфитно-дрожжевой бражки состоит в основном из лигносульфонатов, а в сульфитно-спиртовой бражке может содержаться до 1% пентозных моносахаридов. Содержание сульфогрупп в лигносульфонатах колеблется в интервале 2,0–2,5 мэкв/г.

В зависимости от содержания сухих веществ в конечном продукте технические лигносульфонаты бывают трех видов: жидкие концентраты (КБЖ), содержащие до 50% сухих веществ; твердые концентраты (КБТ), содержащие 76–80% сухих веществ; порошкообразные концентраты (КБП), содержащие 87–90% сухих веществ. Высокие поверхностно-активные, клеящие и вяжущие свойства находят применение в промышленности.

Получение ванилина

Из технических лигносульфонатов в ряде стран получают ванилин, широко используемый не только в качестве отдушки в пищевой и парфюмерной промышленности, но также для получения медицинских препаратов и синтеза других соединений.

В природе ванилин встречается в значительных количествах (1,2–2,7%) в плодах тропического растения — ваниль, откуда его выделяют в промышленных масштабах. Однако экономически целесообразнее его получать окислением лигносульфонатов кислородом в щелочной среде (рис. 14.19), и в настоящее время при общем объеме ежегодно производимого ванилина около 6000 т. более 70% вещества получают из лигносульфонатов.

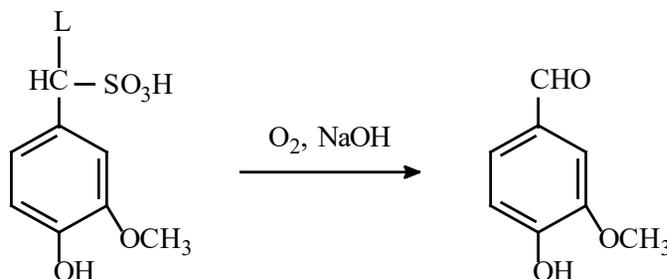


Рис. 14.19. Схема получения ванилина из лигносульфонатов

СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ

Сравнение технологий целлюлозно-бумажного производства по технологическим циклам

Для сравнения технологий целлюлозно-бумажной промышленности по технологическим циклам необходимо определить показатели, пригодные для сравнения, согласно следующим условиям:

- их актуальность для развития ЦБП на протяжении всех технологических циклов;
- наличие сопоставимых статистических данных за рассматриваемый период.

Для характеристики ЦБП можно использовать критерий ресурсоемкости, экологичности и трудоемкости. В истории развития ЦБП во всех ее циклах перечисленные критерии существенно менялись и не подкреплены надежными статистическими данными. Так, по критерию производительности труда численность работников ЦБП в настоящее время приведена вместе с численностью работников издательской и полиграфической деятельности, что делает невозможным расчет показателя среднеотраслевой производительности труда (отношение объема производства бумаги и картона к численности занятых в отрасли). Для этого критерия использованы имеющиеся в литературе данные по отдельным предприятиям в каждом цикле развития отечественной ЦБП и данные фирмы «Яакко Поури» для четвертого и пятого технологического цикла. Производительность труда в первом технологическом цикле составила $\sim 0,8$ т/чел. (1825); на втором $\sim 1,5$ т/чел. (1862). В первых циклах развития рост производительности связан с механизацией производства, облегчающей ручной труд при размоле тряпья на отдельные волокна, и заменой ручного отлива бумаги на машинное черпание массы. Однако ручной труд продолжал преобладать над машинным. В третьем цикле производительность труда выросла в 30 раз и составила ~ 50 т/чел. (1925). Причиной бурного роста стало зарождение производства технической целлюлозы взамен тряпья, что увеличило сырьевую базу бумажного производства. Второй причиной стала механизация бумажного производства за счет установки электрических двигателей и изменения в конструкции бумажных машин, которые с 1900 по 1920 г. повысили производительность в 5 раз с 20 до 100 т/сут. В четвертом цикле технологического развития минимальный и максимальный уровень производительности составил 500–1500 т/чел. Для отечественных предприятий производительность незначительная, но превышает нижний уровень. Повышение производительности труда связано с ростом производства целлюлозы, внедрением новых технологий, расширяющих использование хвойных и лиственных пород древесины для производства волокнистых полуфабрикатов и улучшающих их бумагообразующие свойства. Совершенствуются конструкции бумагоделательного оборудования, в том числе за счет активной реконструкции существующих машин. В частности, для более эффективного обезвоживания бумажного полотна при реконструкции сеточной части используют «верхние» или «гибридные» формующие устройства, устанавливаемые над сеточным столом реконструированной машины. Для повышения эффективности сушки бумажного полотна при высоких скоростях стали применять специальные планки, прикрепляемые к внутренней поверхности сушильных цилиндров. Эти планки служат для разрушения и турбулизации слоя конденсата на этой поверхности, что увеличивает коэффициент теплопередачи. Все мероприятия направлены на увеличение скорости быстроходных (рабочая скорость 900–1200 м/мин) и широких (до 9 м) машин и повышение качества бумаги различного ассортимента с массой 45–60 г/м². В пятом технологическом цикле развития минимальный и максимальный уровень производительности составил 800–2000 т/чел. Скорость быстроходных машин достигла 1500 м/мин при ширине более 10 м. Для отечественных предприятий производительность незначительная, но превышает нижний уровень. Рост производительности труда связан с активным развитием сырьевой базы бумажного производства за счет реализации более совершенных технологий получения волокнистых полуфабрикатов и повышения их качества; использования макулатурного волокна, которое составляет 30% от всех волокон (1990), а в 2003 г. доля макулатурных волокон составила более 50% и к 2018 г. достигла уже более 60%. На производительность труда влияет постоянная реконструкция существующего и появление нового бумагоделательного оборудования. В этом цикле развития конструкция сеточной, прессовой и сушильной части бумагоделательных машин уже позволяет вырабатывать бумажное полотно со скоростью свыше 2000 м/мин, однако практическое освоение таких скоростей сдерживается наличием участков открытой передачи волокна между прессами, особенно между прессовой и сушильной частями бумагоделательной машины, и над этим работают конструкторы.

Внедряются автоматизированные системы оперативно-диспетчерского управления (АСО-ДУ), осуществляющие контроль и управление технологическими процессами, а также диагностику состояния оборудования, оценивающую надежность его работы.

Сравнение технологий производства целлюлозных полуфабрикатов

Проведем сравнение основных в настоящее время технологий по показателям ресурсосбережения, энергоэффективности и экологичности, поскольку данные показатели отвечают задачам совершенствования современных технологий в области производства волокнистых полуфабрикатов.

О качестве целлюлозных полуфабрикатов. Скоростным широкоформатным бумагоделательным машинам со скоростью 1500–1800 м/мин необходимо высококачественное сырье — однородное по составу волокна и обладающее однородными высокими физико-механическими характеристиками, чтобы обеспечить рабочую скорость машины. Это требует от производителей целлюлозы внимательного отношения к породному составу и качеству древесного сырья. Четверть века назад качество целлюлозы оценивали только по длине и ширине волокна: чем оно длиннее, тем выше качество целлюлозы. Но современные технологии производства бумажно-картонной продукции ввели новые показатели оценки качества и пригодности целлюлозы, в частности грубость волокна (определяют как отношение массы волокон, составленных по длине на отрезке 1 м, и выражают в мкг/м), индекс армирования, влияющие на расходы электроэнергии при размоле и прочностные характеристики бумажного листа. Поэтому производитель целлюлозы должен учитывать имеющиеся свойства волокна той или иной породы древесины и строить технологию производства так, чтобы максимально сохранить в целлюлозном полуфабрикате ее природные свойства. Так, волокна с тонкой клеточной стенкой (осина, эвкалипт) образуют бумажный лист с большей площадью поперечных связей, обеспечивающих повышенную прочность листа на разрыв и продавливание. Волокна с толстой клеточной стенкой (лиственница, береза) образуют пухлый лист с незначительной площадью контакта, что снижает механические свойства листа.

Все породы, как хвойные, так и лиственные, имеют разные по длине волокна, с разной толщиной клеточной стенки и разной величиной базисной плотности древесины. Начиная с 1970-х гг. в мире стали переходить на варку щепы близких по плотности хвойных пород древесины и отдельно варить древесину березы и отдельно осины.

Породный состав воображаемого леса России разнообразен и состоит из хвойных пород, в составе которых: 32% — лиственница; 20% — сосна; 15% — ель; 10% — кедр; 3% — пихта, и лиственных пород в составе: 13% — береза; 5% — осина; 1% — дуб, 1% — прочие. Именно разнообразие породного состава и сплошные рубки при заготовке леса подтолкнули в 1990-е гг. отечественных производителей использовать на варку смесь из всех поступающих хвойных пород. Кроме того, к хвойным породам на варку стали добавлять 10% лиственных, аргументируя невозможность отделения этого количества лиственных пород от хвойной древесины в процессе заготовки. Помимо снижения качества волокнистого полуфабриката это увеличивает потери годной древесины на подготовку щепы, повышает расход щелочи на варку и увеличивает потери выхода товарной целлюлозы. Поэтому переход на НДТ в производстве сульфатной целлюлозы без изменения данного подхода к использованию лесосырья не даст ожидаемого экономического эффекта, который был получен на зарубежных предприятиях. Рассмотрим данный вопрос на конкретных примерах.

Удельный расход круглого леса на подготовку щепы

Дополнительные потери годной древесины (без учета коры) при существующей технологии подготовки щепы из круглого леса возрастают в 1,5–3 раза при использовании смеси разных древесных пород на стадиях окорки и рубки (табл. 14.28).

Таблица 14.28. Потери годной древесины при подготовке щепы из круглого леса по существующей технологии и НДТ

Стадия производства волокна		Потери годной древесины, %			
		Ель	Со-сна + ель	Со-сна + ель + лиственница	Береза + осина
1	Данные промышленных предприятий РФ по старой технологии	4,0	5,8	7,2	9,8
2	По НДТ (размораживающий транспортер + рубительная машина с горизонтальной подачей бревна и нижней выгрузкой щепы)	2,6*			3,0*
3	Дополнительные потери древесины по сравнению с НДТ	1,4	3,2	4,6	6,8

* Величина потерь при использовании древесины одной породы или древесных пород, близких по плотности, чтобы предотвратить дополнительные потери (данные производителей оборудования). В ИТС 1–15 данные потерь круглого леса при подготовке щепы на действующих производствах составляют 9–12%.

Потери годной древесины при подготовке щепы зависят не только от состава оборудования, соответствующего НДТ, но требуется использование однородного состава круглого леса, имеющего близкую плотность древесины и физические размеры, чтобы минимизировать образование лома и отщепов в процессе окорки. Поэтому для сокращения потерь древесины требуется подготовка щепы по породам близкой базисной плотности. Кроме того, лимитирующая стадия процесса варки — диффузия варочного раствора в капиллярах и порах каждой щепки. Поэтому для снижения потерь волокна при варке целлюлозы за счет непровара важно иметь близкую плотность древесины щепы, что обеспечивает щепу одной древесной породы, поступающей на варку, или композиция щепы древесных пород с близкой базисной плотностью, поступающая в варочный котел. Наилучший результат дает смешение щепы разных пород в определенных соотношениях по объему перед стадией сортирования щепы, на которой произойдет ее перемешивание до однородного состава.

Оценим затраты от потери круглого леса при подготовке щепы для производства 500 тыс. хвойной целлюлозы, на варку которой требуется 2,25 млн пл. м³ щепы. Исходя из величины потерь древесины при подготовке щепы 2,6%, при использовании НДТ, круглого леса потребуется 2,31 млн пл. м³ ($2,25 \times 2,6/100$). Примем это количество круглого леса за базовый уровень — обоснованный НДТ. Тогда при потерях 4% нужно дополнительно поставить 30 тыс. пл. м³ круглого леса на сумму 30 млн рублей; при потерях 5,8% дополнительно 70 тыс. пл. м³ на сумму 70 млн рублей; и при потерях 7,2% дополнительно 102 тыс. пл. м³ на сумму 102 млн рублей. Эти дополнительные затраты только по древесно-подготовительному цеху, к которым нужно отнести и дополнительные затраты, которые будут на линии производства целлюлозы.

Удельный расход древесного сырья для получения товарной продукции

Рассмотрим потери волокна в процессе производства товарной белой целлюлозы из хвойных пород древесины по существующей технологии и НДТ.

Сравнение потерь волокна при отбелке целлюлозы по НДТ на зарубежном предприятии и на отечественном предприятии с КЦО показывает, что потери волокна на нашем

предприятия на 1% выше, и это обусловлено использованием смеси древесных пород разной базисной плотности. При использовании существующей технологии отбелки с хлором потери волокна выше на 2,5%. Оценим потери волокна при производстве 500 тыс. хвойной целлюлозы. Исходя из величины коэффициента выхода товарной целлюлозы 0,9280 при использовании НДТ (см. табл. 14.29), потребуется сварить 539 тыс. т целлюлозы (500 000/0,9280). Примем это количество за базовый уровень — обоснованный НДТ. Тогда для предприятия с коэффициентом выхода 0,9184 нужно дополнительно сварить 5000 т целлюлозы, для чего потребуется 22 500 пл. м³ щепы на сумму 33,7 млн рублей; для предприятия с коэффициентом выхода 0,9040 требуется дополнительно сварить 14 000 т целлюлозы, для чего потребуется 63 000 пл. м³ щепы на сумму 94,5 млн рублей. В данном расчете учтены затраты только на древесное сырье и не учтены затраты на процесс варки целлюлозы (пар, электричество, потери от недополученной продукции). Похожие данные получаются при расчете потерь при производстве товарной целлюлозы из смеси лиственной древесины (осины и березы). Кроме того, такая товарная целлюлоза из смеси пород имеет неоднородные свойства волокон и поэтому стоит на рынке дешевле.

Таблица 14.29. Проценты потерь волокна по стадиям производства сульфатной беленой целлюлозы из хвойной древесины по НДТ и на предприятиях РФ с КЦО (технология ЕСФ) и при отбелке с хлором

Стадии производства линии волокна	Предприятие РФ без КЦО	Предприятие РФ с КЦО	Предприятие по НДТ, данные фирмы «Яакко Поури»
Отходы небеленой целлюлозы			
– промои волокна, %	0,5	0,5	
– сучки и непровар, %	1,4	1,5	1,7
– отходы сортирования, %	0,4		
Потери при отбелке, %	7,2	6,1	5,5 (КЦО — 2,5 + 3 — отбелка)
Потери при отчистке беленой целлюлозы, %	0,3	0,2	0,1
Коэффициент выхода товарной целлюлозы	0,9040	0,9184	0,9280

Удельный расход свежей воды

В табл. 14.30 представлены величины удельного расхода свежей воды на одном предприятии Российской Федерации по технологическим участкам, которые сравниваются с данными по минимальному расходу воды на лучших зарубежных предприятиях в течение трех периодов.

Основное несоответствие в удельном расходе воды на отечественном предприятии связано с техническим уровнем установленного технологического оборудования на всех участках производственной линии и нерешенными вопросами очистки и использования на производственные цели конденсатов выпарных станций взамен свежей воды. Как показывает мировая практика, на решение данной задачи на действующем предприятии требуется несколько десятилетий, в течение которых происходит планомерная техническая модернизация всего производства. Расход свежей воды — маркерный показатель (ИТС 1–15) уровня технического перевооружения действующего предприятия. При строительстве новых заводов удельный расход свежей воды уже заложен в соответствии с НДТ.

Таблица 14.30. Изменение расхода свежей воды на передовых предприятиях беленой сульфатной целлюлозы с 1975 по 1995 г. и на предприятии РФ с 2000 по 2015 г.

Производственный участок	Работа передовых предприятий			Удельный расход свежей воды на 1 т в. с. товарной беленой целлюлозы на предприятии РФ			
	1975–1985 гг.	1985–1995 гг.	1995 — по настоящее время	2000 г.	2005 г.	2010 г.	2015 г.
Варочный	1,1	1,0	0,2	1,3	1,1	1,1	1,1
Промывка и сортирование	4,2	1,8	0,2	32,7	7,7	7	6,4
Отбельный цех	55	31	10	48,1	33,8	33,8	29,0
Приготовление химикатов	0,5	0,8	0,2	4,7	3,1	2,5	1,0
Расход на целлюлозном заводе	60,8	34,6	10,6	86,8	45,7	44,4	37,5
Выпарная станция	0,7	0,6	0,2	81,9	43,7	40,8	34,4
Регенерация	2,1	0,6	0,2	14,9	12,9	3,6	3,6
Каустизация	2,6	1,3	0,3	4,5	3,3	2,3	2,3
Энергетический котел	4,9	0,9	0,5	8,7	8,7	1,2	1,2
На регенерацию и получение энергии	10,3	3,4	1,2	110,0	68,6	47,9	41,5
Сушка целлюлозы	6,5	6,2	0,4	26,5	26,5	28,6	7,2
Суммарные затраты, м³/т товарной в. с. ц.	77,6	44,2	12,2	223,3	140,8	120,9	86,2*

Примечания:

На производстве количество поступающей свежей воды принимается равным количеству сбрасываемых вод.

* НДТ в ИТС 1–15, Приложение Д, табл. Д1 — маркерный показатель для производства сульфатной беленой целлюлозы — 25–50 м³/т.

Удельный расход электрической энергии

По данным предприятий, удельный расход электрической энергии на 1 т товарной продукции из хвойной и лиственной древесины находится в пределах: для лиственных пород минимальный — 650 кВт·ч/т и максимальный — 800 кВт·ч/т, и для хвойной — 750 и 900 соответственно (уровни расхода по данным фирмы «Яакко Поури»). В ИТС 1–15 (табл. Б6) указан расход, соответствующий НДТ, равный 712 кВт·ч/т товарной целлюлозы без указания вида перерабатываемой древесины и диапазона возможных значений.

Удельный расход тепловой энергии в паре

В табл. 14.31 приведены данные по удельному расходу пара на производство сульфатной целлюлозы по технологии ECF с применением КЩО для предприятий Северной Америки и Европы в 1980-е и 1990-е гг. отдельно для лиственной и хвойной целлюлозы, а также данные справочника ИТС 1–15 за 2015 г. без указания породы древесины (табл. Б4). Эти сведения позволяют отследить изменение удельного расхода пара за последние 35 лет. Для сравнения приведены данные отечественных предприятий для отбелки с хлором и после перехода на КЩД. Показано, что при переходе на отбелку с КЩО расход пара в отбельном цехе на обоих предприятиях сократился в 4–5 раз. Суммарный расход пара 2,99 Гкал/т товарной целлюлозы для предприятия лиственной целлюлозы соответствует требованиям энергоэффективного предприятия по ИТС 1–15 (табл. Б4), тогда как для хвойного предприятия расход 3,82 Гкал/т не соответствует. Действующим предприятиям потребуется постоянная и поэтапная модернизация всех звеньев производственной цепи, в том числе для использования конденсатов выпарных станций, чтобы добиться энергоэффективного производства.

Таблица 14.31. Удельный расход пара, в пересчете на Гкал/т товарной целлюлозы

	Производство щепы	Варка, промывка, сортирование	КЩД	Отбелка	Сушка	Приготовление химикатов	Каустизация, обжиг извести	Выпарка щелоков, отпарка конденсатов	Регенерация химикатов	Остальное	Всего
Лиственная целлюлоза											
Северная Америка, 1980-е гг.	0,09	0,46	0,07	0,81	0,98	0,04	0	0,9	0,25	нет	3,60
Европа, 1990-е гг.	0,1	0,53	0	0,16	0,71	0,07	0,07	0,72	0,23	нет	2,59
Предприятие РФ без КЩО	нет	0,61	нет	1,053	1,16	0,008	0,07	1,71		нет	4,61
Предприятие РФ с КЩО	0,05	0,61	0,07	0,25	0,86	0,007	0,08	0,79	0,27	нет	2,99
Хвойная целлюлоза											
Северная Америка, 1990-е гг.	0	0,79	0,04	0,14	1,07	0,09	0	1,29	0,62	нет	4,04
Европа, 1990-е гг.	0,05	0,76	0,05	0,1	0,74	0,07	0	1,0	0,38	нет	3,15
Предприятие РФ до КЩО	0,09	0,87	нет	0,69	1,0	0,16	0,008	0,89	1,02	нет	4,72
Предприятие РФ после КЩО	0,06	0,79	0,05	0,12	1,0	0,1	0,008	1,2	0,49	нет	3,82
Без разделения на породы древесины (ИТС 1–15)											
2015 г. ИТС 1–15, табл. Б4	0	0,38–0,48	0,05–0,09	0,36–0,48	0,52–0,62	нет	нет	0,95–1,07	нет	0,36–0,48	2,62–3,22

Повышение энергоэффективности периодической сульфатной варки

Одним из направлений совершенствования периодической сульфатной варки является сокращение удельного расхода тепловой энергии в паре до уровня, соответствующего непрерывному способу варки. Основное техническое решение — использование тепла горячего варочного щелока, вытесненного из котла по окончании варки, для нагрева белого щелока перед поступлением в варочный котел следующего варочного цикла. Это существенно сокращает затраты и для предприятия производительностью 1000 т/сут и дает экономию 2,5–5 млн долларов в год. В табл. 14.32 приведены сравнительные данные энергозатрат в различных вариантах периодической сульфатной варки (в Гкал).

Кроме энергетических преимуществ, данная технология периодической варки обеспечивает промывку целлюлозы в котле, холодную выгрузку массы, имеющую более высокие показатели механической прочности целлюлозы, и сокращает образование дурнопахнущих газов. Существуют несколько модификаций данной периодической варки, представленных в табл. 14.33.

Таблица 14.32. Сравнительные данные энергозатрат в различных вариантах периодической сульфатной варки, Гкал

Технологические процессы	Обычная периодическая варка		Периодическая варка с холодной выгрузкой	
	с прямым обогревом	с непрямым обогревом	с прямым обогревом	с непрямым обогревом
Варка	1,12	0,98	0,62	0,57
Выпарка	1,12	0,88	1,0	0,91
ИТОГО	2,24	1,86	1,62	1,48

Таблица 14.33. Сравнение технологических операций различных видов энергосберегающих варок RDH, SuperBatch, EnerBatch с традиционной варкой

Технологические операции	Обычная варка	RDH	SuperBatch	EnerBatch
Загрузка котла щепой	Уплотнение паром	Пропарка, уплотнение щепы разбавленным черным щелоком 15–30 мин	Уплотнение щепы паром, уплотнение щепы черным теплым щелоком	Уплотнение щепы паром
Пропитка	–	Теплым черным щелоком	Теплым черным щелоком, затем горячим черным щелоком	Смесью белого и пропиточного щелока
Закачка варочных растворов	Белый и черный щелок (80°С)	Горячий белый щелок (170°С), горячий черный щелок (160°С)	Горячий белый щелок (165°С), горячий черный щелок (160°С)	Горячий белый щелок (155°С), горячий черный щелок (170°С)
Температура в котле после закачки щелоков, °С	60–80	157–163	145–155	155–165
Нагрев котла до температуры варки	Прямой и непрямо́й нагрев	Быстрый непрямо́й нагрев	Быстрый непрямо́й нагрев	Быстрый прямо́й и непрямо́й нагрев
Конечная температура варки, °С	165–172	170–175	170–175	155–170
Стоянка на конечной температуре, мин	60–120	75–90	60–120	20–100
Вытеснение отработанного горячего черного щелока	–	Промывным фильтратом снизу вверх, 25–30 мин	Промывным фильтратом снизу вверх, 25–30 мин	Промывным фильтратом сверху вниз, 25 мин
Выгрузка массы	Выдувка	Выдувка воздухом или вымывка насосом при температуре ниже 100°С	Вымывка с откачкой насосом при температуре ниже 100°С	Вымывка с откачкой насосом при температуре ниже 100°С
Оборот котла, мин	240–390	150–240	180–240	120–240
Использование тепла отработанного черного щелока	–	На пропитку щепы, варку, нагрев белого щелока	На пропитку щепы, варку, нагрев белого щелока	На пропитку щепы, варку, нагрев белого щелока

Сравнение сульфитной варки целлюлозы

Отечественные предприятия требуют модернизации. Рассмотрим практику модернизации крупнейшего в мире завода по производству бисульфитной целлюлозы на магниевом основании фирмы «Стура» в г. Нюмелла (Швеция). Фирма производит 265 тыс. т/год целлюлозы; на этом заводе с конца 1987 г. применяют метод «быстрого нагрева котла и быстрого вытеснения горячего щелока с последующей холодной выдувкой», разработанный компанией «Билойт» (США), что сократило время варки на 30 минут. После окончания варки отработанный раствор с температурой 130–155°С вытесняют в аккумулятор горячего щелока, но сначала он проходит теплообменник, где нагревает новый варочный раствор. Часть горячего щелока подают в котел на начало варки, а остальную часть упаривают в выпарной установке до 65% а. с. в. В котел после вытеснения горячего отработанного раствора подают промывной фильтрат и выдувают массу с температурой 90°С. Упаренный щелок сжигают и из дымовых газов в электрофильтрах выделяют оксид магния. Затем дымовые газы используют для сушки коры, которую сжигают в энергетических котлах. Новый метод варки дал значительную экономию пара, повысилась степень регенерации диоксида серы за счет промывки в котле, поскольку целлюлоза промывается лучше. Эффективность промывки небеленой целлюлозы достигает 98%. Стоки предприятия проходят биологическую очистку. Если в 1970 г. завод производил 115 тыс. т целлюлозы и расходовал 30 тыс. т мазута, то в конце 1980-х гг. при увеличении производства в 2,3 раза до 265 тыс. т расход мазута стал в 10 раз меньше, 2–3 тыс. т, благодаря внедрению энергосберегающих технических решений. Нужно отметить, что два потока производства целлюлозы обслуживают 30 рабочих.

Этот пример показывает значительно более низкий технический уровень отечественных заводов, 2/3 которых построены более 50 лет назад и не подвергались необходимой реконструкции. Это привело к тому, что из 100% сульфитных щелоков только 12% сжигаются и на подавляющем большинстве предприятий промывка целлюлозы осуществляется по отсталой технологии в сщежах с крайне низкой степенью отбора щелоков чуть более 60%. Отсутствует или недостаточна мощность выпарных установок для получения жидких лигносульфонатов, отсутствует их сбыт в полном объеме. Очистные сооружения отсутствуют на 19 предприятиях. Перечисленные недостатки — основные причины загрязнения водоемов, низкой энергоэффективности и высоких производственных затрат на отечественных предприятиях. Кроме того, из представленных данных ясно, что для окупаемости проекта реконструкции по аналогии с предприятием в Швеции потребовалось увеличить производственную мощность завода на 150 тыс. т — до 265 тыс. т целлюлозы в год. Это подтверждают и расчеты отечественных экономистов, которые показывают, что превышение суммы прибыли от реализации товарной продукции над себестоимостью производства достигается лишь при объеме выпуска целлюлозы более 230–250 тыс. т/год. Если рентабельность производства к себестоимости продукции составит 30% и рентабельность к фондам — 12%, то в этом случае минимальный срок окупаемости капитальных вложений — девять лет. Поэтому ясно, что для 50% отечественных сульфитцеллюлозных предприятий со средней мощностью 30 тыс. т/год и менее экономическая и экологическая ситуация заставят закрыть производство.

Сравнение технологии отбелки целлюлозы

В 1980-е гг. сбросы загрязнений от отбелки сульфатной целлюлозы составили 80% от общего поступления загрязнений завода. Рассмотрим подробнее реализацию снижения сброса загрязнений сульфатцеллюлозного завода. Сделаем упрощение, что в процессе отбелки целлюлозы нас интересует только количественное изменение лигнина в древесине и целлюлозе. Как видно из табл. 14.34, в процессе отбелки из 1 т небеленой лиственной целлюлозы требуется удалить 20–26 кг остаточного лигнина, из небеленой целлюлозы хвойных пород — 38–48 кг. Таким образом, основная задача технологии отбелки — удалить

это количество лигнина с минимальными производственными издержками и минимальными сбросами загрязняющих веществ в окружающую среду.

Таблица 14.34. Изменение содержания остаточного лигнина при отбелке сульфатной лиственной и хвойной целлюлозы (расчетные данные)

	Лиственная целлюлоза	Хвойная целлюлоза
Содержание лигнина в 1 тонне целлюлозы после варки	22–28 кг	40–50 кг
Содержание лигнина в 1 тонне беленой целлюлозы	2 кг	2 кг
Количество удаленного лигнина	20–26 кг	38–48 кг

Рассмотрим варианты развития схем отбелки сульфатной целлюлозы из хвойных пород древесины. Из табл. 14.34 видно, что при отбелке целлюлозы из хвойных пород древесины лигнина должно удаляться почти в два раза больше, чем из целлюлозы лиственных пород, и, следовательно, технология делигнификации будет различной. Нужно отметить, что изменение количества АОХ в табл. 14.35, 14.36 носит сугубо экспертный характер на основе принятого упрощения в табл. 14.34 и служит только для демонстрации механизма совершенствования методов отбелки целлюлозы.

В табл. 14.35 представлены четыре схемы отбелки сульфатной хвойной целлюлозы: № 1 — с хлором; № 2 — со 100%-ным замещением хлора на диоксид хлора — бесхлорная отбелка, № 3 — с КЩО — отбелка ECF (Elementary Chlorine Free) и № 4 — с КЩО и ступенью озона (Оз) — отбелка «легкая» (ECF). Как указано в табл. 14.35, общее количество растворенного лигнина во всех схемах № 1–4 одинаково и составляет 48 кг/т, или 100% содержащегося в целлюлозе остаточного лигнина после варки. От схемы № 1 и № 2 все 100% растворенного лигнина попадают на очистные сооружения. Однако в стоках схемы № 1 содержание хлорорганических соединений составляет 9,6 кг/т целлюлозы, что в два раза больше, чем в схеме № 2 (4,8 кг/т). Это связано с разным механизмом протекания реакций лигнина с хлором и диоксидом хлора. Реакция хлорирования с лигнином преимущественно идет по механизму замещения атомов водорода атомами хлора, а окислительных реакций, разрушающих макромолекулы лигнина, протекает немного. В результате в основном образуются высокомолекулярные хлорорганические соединения лигнина, что определяет их высокую токсичность и низкую степень удаления при биологической очистке порядка 30%. Соответственно, после очистных сооружений 6,7 кг хлорорганических соединений вместе с очищенной водой попадают в водоемы. В отличие от хлора, реакции лигнина с диоксидом хлора носят преимущественно окислительный характер, а реакций замещения атомов водорода в лигнине на хлор протекает меньше и образуются низкомолекулярные продукты с меньшим содержанием хлорорганических соединений. Благодаря этому токсичность стока от бесхлорной схемы № 2 существенно ниже, поэтому степень их очистки порядка 80% и в окружающие водоемы сбрасывают 1 кг АОХ. В 1980-е гг. такую технологию рассматривали как кратковременную меру для снижения сброса АОХ, поскольку она не обеспечивает сжигание загрязнений вместе с черным щелоком в СРК и поэтому не отвечает принципам технологии ECF.

В схеме № 3 использование кислородно-щелочной делигнификации (КЩД) способствует растворению и сжиганию в СРК 50% остаточного лигнина (24 кг/т). Следовательно, после КЩД в отбельном цехе осталось удалить только половину остаточного лигнина. Это сокращает расход диоксида хлора на отбелку и поступление АОХ на очистку в 2 раза (2,4 кг/т) по сравнению со схемой № 2. Кроме того, меньшее содержание АОХ делает меньшей токсичность стока, что повышает степень очистки до 90%, и сброс АОХ в водоем с очищенными водами составляет 0,24 кг/т. Такая технология отбелки с КЩО отвечает принципам отбелки ECF, однако сброс АОХ выше рекомендованного ХЕЛКОМ 0,2 кг/т. Поэтому КЩО для хвойной

целлюлозы проводят не в одну, а в две ступени, и в этом случае сброс АОХ с очищенными стоками ниже 0,2 кг/т, что соответствует требованиям ХЕЛКОМ.

Позднее разработана технология «легкой» ECF, которая показана в схеме № 4. Ее отличие в том, что к КЩО с двумя ступенями обработки кислородом добавлена еще одна делигнифицирующая ступень — ступень озонирования. Поэтому в СРК поступает от отбелки 36 кг/т лигнина и для последующей отбелки остается только 12 кг/т, или 25% от содержания лигнина в целлюлозе после варки. Это позволяет дополнительно снизить расход диоксида хлора и достичь количества АОХ на сбросе в окружающие водоемы 0,12 кг/т.

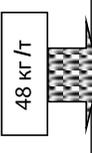
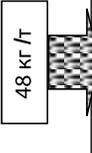
Аналогичное построение технологических схем и для отбелки лиственной целлюлозы (см. табл. 14.33). Благодаря меньшему содержанию остаточного лигнина для отбелки лиственной целлюлозы применяют КЩО в одну ступень.

На рубеже 80-х и 90-х гг. прошлого столетия дискутировалась возможность использования хлора после кислородно-щелочной делигнификации. Было показано, что использование хлора после КЩО в 13 раз увеличивает содержание АОХ на 1 т в. с. ц. по сравнению с диоксидом хлора (с 0,3 кг/т в. с. ц. до 3,9 кг/т при отбелке хвойной и с 0,10 до 1,3 кг/т при отбелке лиственной целлюлозы). Было также установлено, что на ступенях хлорирования (Х), щелочения (Щ) и гипохлоритной отбелки (Г) образуется хлороформ в количестве до 1200 г/т в. с. ц. Там же отмечалось, в частности, что на ступени хлорирования при температуре 25°С образуется ~20 г/т в. с. ц. хлороформа, а при повышении температуры до 60°С образуется более 300 г/т в. с. ц. хлороформа. Поэтому полное исключение молекулярного хлора и гипохлорита из схем отбелки является первостепенной задачей. Как уже было показано выше, технология по схеме № 2 (табл. 14.32) не отвечает требованиям НДТ по Рекомендации ХЕЛКОМ, поскольку загрязненные фильтраты отбелки содержат АОХ 0,5 кг/т. В ИТС 1–15 (табл. Д2) технология отбелки для действующих предприятий соответствует НДТ, если сброс АОХ не более 0,40 кг/т в. с. ц. Таким образом, для действующих предприятий сброс АОХ должен укладываться в этот интервал без указания требования на использование фильтрата в системе регенерации химикатов. Однако реализация подобной технологии консервирует технологическую отсталость производства, поскольку требует капитальных затрат на увеличение производительности установки по получению диоксида хлора и высоких производственных затрат для схемы отбелки с повышенным в три раза расходом дорогого реагента — диоксида хлора вместо дешевого реагента кислорода.

В табл. 14.37 представлена экспертная оценка содержания загрязняющих веществ в сточных водах сульфатцеллюлозных производств. Нужно отметить (табл. 14.37), что удельный уровень нагрузки загрязнений от производства сульфатной целлюлозы по всем загрязняющим веществам на отечественных предприятиях, работающих с хлором и гипохлоритом, *после очистки* выше, а ведь на очистку стоков предприятия тратят значительные средства. Поэтому применение технологии отбелки целлюлозы без использования молекулярного хлора (ECF), при которой стоки от обработки кислородом (КЩО) и озоном (Оз), содержащие растворенный лигнин, вместе с черным щелоком сжигают в СРК, — правильное решение. Сокращение остаточного лигнина в целлюлозе кислородсодержащими реагентами снижает расход диоксида хлора на последующую отбелку. Это сокращает количество хлорсодержащих соединений в стоках и возможные платы предприятия за вред окружающей среде по сравнению с существующими производствами с технологией середины 80-х гг. прошлого века.

Смена технологической платформы и переход на НДТ — это не только улучшение экологической безопасности производства, но и снижение его издержек. Себестоимость продукции снижается при переходе от хлорной отбелки к отбелке с кислородно-щелочной обработкой. (В ИТС1–15 указывается противоположное.) В табл. 14.38 представлены экспертные удельные расходы химикатов, древесного сырья, энергоресурсов в процессе хлорной отбелки сульфатной лиственной целлюлозы по схеме № 5 «Х/Д — Щ — Г — Д₁ — Щ — Д₂» и по схеме ECF № 7 «О — Д₀ — ЩОП — Д₁Д₂».

Таблица 14.35. Различные схемы отбели сульфатной хвойной целлюлозы

Годы производства	1970-е гг.		Середина 1980-х гг.		Начало 2000-х гг.	
Вид отбели	Хлорная отбелика		Отбелика без хлора		Отбелика без хлора — «легкая» ECF	
Обозначение	№ 1		№ 2		№ 3	
Технологическая схема	X/D — Щ — Г — Д — Щ — Д — К		D ₀ — ЩО — Д — ЩГ — Д — К		D ₀ — ЩОП — Д — ЩП — Д — К	
Количество растворенного лигнина в процессе отбели						
Количество АОХ, поступающее со стоками на биологическую очистку (БОС)	9,6 кг/т		4,8 кг/т		24 кг/т 17 кг/т	
Процент очистки АОХ на БОС	30%		80%		90%	
Сброс АОХ с очищенными водами в водоем	6,7 кг/т		1 кг/т		(O) — 2,4 кг/т (O-O) — 1,7 кг/т	
Рекомендации ХЕЛКОМ по сбросу АОХ	0,4 кг/т (существующее предприятие) 0,2 кг/т (новое производство)		СРК		СРК	

Примечания:

- Схема № 1 «X/D — Щ — Г — Д — Щ — Д — К» состоит из следующих стадий:
X/D — хлорирование с добавлением диоксида хлора;
Щ — щелочная обработка;
Г — обработка гипохлоритом;
D₁, D₂ — отбелика диоксидом хлора;
Щ — щелочная обработка;
К — кислотка водным раствором SO₂.
- Схема № 2 «D — ЩОП — D₀ — Щ — D₂ — К» состоит из следующих стадий:
D₀ — делигнификация диоксидом хлора;
ЩОП — щелочная обработка в присутствии кислорода;
D₁, D₂ — отбелика диоксидом хлора;
Щ — щелочная обработка в присутствии гипохлорита;
К — кислотка водным раствором SO₂.
- Схема № 3 O — D₀ — ЩОП — D — ЩЩ — D — К состоит из следующих стадий:
O — кислородно-щелочная обработка в одну ступень;
- O-O — кислородно-щелочная обработка в две ступени;
D₀ — делигнификация диоксидом хлора (индекс 0 — обозначение без добавления хлора) после кислородно-щелочной обработки;
ЩОП — щелочная обработка в присутствии кислорода и пероксида водорода;
ЩП — щелочная обработка в присутствии пероксида водорода;
D — отбелика диоксидом хлора;
К — кислотка водным раствором SO₂.
4. Схема № 4 O-O — (QOз) — D₀ — ЩО — D — D — К состоит из следующих стадий:
O-O — кислородно-щелочная обработка в две ступени;
D₀ — делигнификация диоксидом хлора после кислородно-щелочной обработки;
ЩО — щелочная обработка в присутствии кислорода;
D — отбелика диоксидом хлора;
K — кислотка водным раствором SO₂.
5. В табл. 14.35, 14.36: темные стрелки обозначают, что растворы химикатов направляются в канализацию, светлая — на регенерацию;
ЩО — щелочная обработка в присутствии кислорода.

Таблица 14.36. Различные схемы отбеливания сульфатной лиственной целлюлозы, образование растворенного лигнина и сброс АОХ в окружающую среду

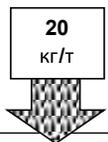
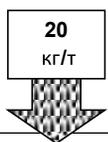
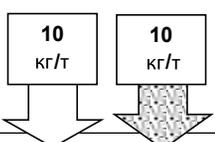
Годы производства	1970-е гг.	Середина 1980-х гг.	
Вид отбеливания	Хлорная отбеливание	Отбеливание без хлора	Отбеливание без хлора ЕСФ
Технологическая схема	Х/Д — Щ — Г — Д — Щ — Д	Д ₀ — ЩОП — Д ₁ — Щ — Д ₂ — К	О — Д ₀ — ЩОП — Д
Обозначение	№ 5	№ 6	№ 7
Количество растворенного лигнина в процессе отбеливания			
Количество АОХ, поступающее со стоками на биологическую очистку (БОС)	5,2 кг/т	2,0 кг/т	СРК 1,0 кг/т
Процент очистки АОХ на БОС	30%	75%	80%
Сброс АОХ с очищенными водами в водоем	3,6 кг/т	0,5 кг/т	0,2 кг/т
Рекомендации ХЕЛКОМ по сбросу АОХ	0,4 кг/т (существующее предприятие) 0,2 кг/т (новое производство)		

Таблица 14.37. Экспертная оценка содержания загрязняющих веществ в сточных водах различных производств

Предприятия, работающие по технологии с хлором и гипохлоритом					Предприятия, работающие по НДТ				
После очистки					После очистки				
АОХ	ХПК	БПК ₅	N _{общ}	P _{общ}	АОХ	ХПК	БПК ₅	N _{общ}	P _{общ}
1,7	37,8	7,5	0,18	0,08	0,0–0,25	10–23	0,3–1,5	0,15	0,02

	ХПК		Хлорид-анион		Хлороформ	
	Сброс в водоем, т/год	Удельный сброс, кг/т в. с. ц.	Сброс в водоем, т/год	Удельный сброс, кг/т в. с. ц.	Сброс в водоем, т/год	Удельный сброс, кг/т в. с. ц.
Технология 80-х гг.	25000	50	25000	50	15	0,03
НСТ	7500	15	20000	40	нет	нет

Сравнение технологий производства древесной массы

Развитие технологии древесной массы направлено на полное или частичное замещение в композиции бумаги технической целлюлозы. Производство механической массы из щепы ТММ, ХТММ, ХММ по качеству волокна и снижению затрат в производстве бумаги превосходило ДДМ. Поэтому в 1980-е гг. в мире производство ДДМ было прекращено и существующие мощности были модифицированы на ДМД или закрыты. Совершенствовалось производство древесной массы в рафинерах из щепы хвойных и лиственных пород со степенью отбеливания, что позволило древесной массе приблизиться по качеству к белой целлюлозе. В ряду видов механической массы показатели механической прочности

увеличиваются: ДДМ < ДМД < РМД < ТММ < ХТММ < ХММ и в обратной последовательности повышаются оптические свойства. Свойства и показатели качества различных полуфабрикатов из древесины ели и осины в сравнении с сульфатной бленой целлюлозой представлены в табл. 14.39.

Таблица 14.38. Экспертная оценка удельных затрат сырья, химикатов и энергоресурсов по схемам для отбели сульфатной лиственной целлюлозы по схемам с использованием хлора «Х/Д — Щ — Г — Д₁ — Щ — Д₂» и ЕСФ: «О — Д₀ — ЩОП — Д_нД₂»

	Схема № 5 Х/Д — Щ — Г — Д ₁ — Щ — Д ₂	Схема № 7 О — Д ₀ — ЩОП — Д _н Д ₂
Хлор, кг/т	22 (22 × 5,59 = 122,98 руб./т)	0
Гипохлорит, кг/т	28 (28 × 26,75 = 749,0 руб./т)	0
Кислород, кг/т	0	26 (26 × 3,56 = 92,56 руб./т)
Окисленный белый щелок, кг/т	0	15 (29,84 руб./т)
Диоксид хлора, кг/т	6,7 (6,7 × 31,86 = 213,46 руб./т)	16 (16 × 31,86 = 509,76 руб./т)
Сода каустическая, кг/т	21 (21 × 9,47 = 198,87 руб./т)	10,5 (10,5 × 9,47 = 99,43 руб./т)
Перекись водорода, кг/т	0	4 (4 × 20,84 = 83,36 руб./т)
Серная кислота, кг/т	0	7 (7 × 1,64 = 12,3 руб./т)
Коэффициент выхода бленой целлюлозы	0,92	0,95
Стоимость щепы на 1 т в. с. бленой целлюлозы	(3,96 : 0,92) × 915,65 = 3941,27 руб./т	(3,96 : 0,95) × 915,65 = 3816,81 руб./т
Расход пара, Гкал/т	1,5 (1,5 × 312,55 = 468,83 руб./т)	0,16 (0,16 × 312,55 = 50,00 руб./т)
Расход воды, м ³ /т в. с. бленой целлюлозы	90 (90 × 1,73 = 155,7 руб./т)	30 (30 × 1,73 = 51,9 руб./т)
Сброс на очистные сооружения, м ³ /т	90 (90 × 1,55 = 139,5 руб./т)	30 (30 × 1,55 = 46,5 руб./т)
Σ удельные затраты	5989,61 руб./т	4792,46 руб./т
	Δ — 1197,15 руб./т	

Примечания:

1. Схема № 5 «Х/Д — Щ — Г — Д₁ — Щ — Д₂» состоит из следующих стадий:
Х/Д — хлорирование с добавлением диоксида хлора;
Г — обработка гипохлоритом;
Д₁, Д₂ — отбелка диоксидом хлора;
Щ — щелочная обработка.

2. Схема № 7 «О — Д₀ — ЩОП — Д_нД₂» состоит из следующих стадий:

О — кислородно-щелочная обработка в одну ступень;
Д₀ — делигнификация диоксидом хлора после кислородно-щелочной обработки;
ЩОП — щелочная обработка в присутствии кислорода и пероксида водорода;
Д_н, Д₂ — отбелка диоксидом хлора без промежуточной промывки и с использованием NaOH после первой ступени;
Щ — щелочная обработка.

Таблица 14.39. Различные виды механической массы из древесины ели и осины, их свойства и показатели качества

Показатель	Порода древесины								
	Ель						Осина		
	Вид полуфабриката								
	ДДМ	ДМД	РММ	ТММ	ХТММ	Беленая ХТММ	Сульфатная беленая целлюлоза	Беленая ХТММ	Сульфатная беленая целлюлоза
Выход, %	96	95	94	94	92	90	46	85	57
Степень помола, °ШР	68	68	68	68	68	32	32	32	32
Пухлость, см ³ /г	2,5	2,6	2,6	2,7	2,5	2,7	1,3	20	1,4
Разрывная длина, км	2,8	3,6	4,0	4,4	4,8	4,4	10,5	5,0	8,0
Сопротивление раздиранию, мН·м ² /г	4,4	5,1	7,4	8,0	8,8	11,3	10,0	6,2	9,1
Белизна, % ISO	59	57	57	55	60	78	88	80	90
Непрозрачность, %	97	96	95	95	94	82	68	86	72
Относительная прочность, %	100	123	154	168	180	201	355	182	251

Как видно из табл. 14.39, выход механической массы почти в два раза превышает выход целлюлозы из древесины, а беленая ХТММ из древесины ели по некоторым показателям приближается к сульфатной беленой целлюлозе. Также нужно отметить важное свойство механической массы — высокую непрозрачность, которая улучшает структуру бумаги и ее печатные свойства, а высокие механические свойства и белизна современной древесной массы позволили ее использовать в производстве высококачественной бумаги для печати и санитарно-гигиенических изделий.

Сравнение технологий переработки макулатуры

В качестве примера рассмотрим наиболее простые и распространенные в середине 1990-х гг. технологические схемы для производства туалетной, упаковочной бумаги и картона. На рис. 14.20 представлена схема подготовки макулатурного волокна, которая при небольшом числе технологических операций достигала достаточной однородности волокнистой массы вторичных волокон при небольших потерях волокна при производстве туалетной бумаги низкого качества.

Схема, представленная на рис. 14.20, была усовершенствована дополнительными ступенями очистки и сортирования, см. рис. 14.21. Эта схема позволяет получать макулатурные волокна для упаковочных видов бумаги, кровельного слоя картона и бумаги для гофрирования.

Наиболее высокотехнологичная схема представлена на рис. 14.22. Чем длиннее волокно, тем выше механические свойства бумаги, поэтому степень фракционирования, приведенная

в данной схеме, обеспечила высокое качество макулатурного волокна и рациональное использование коротких и длинных волокон в различных видах продукции.

Схемы подготовки макулатурных волокон (рис. 14.20–14.22) используют для производства бурых сортов бумаги и картона, для которых можно использовать 1, 2 и 4 группы макулатуры.

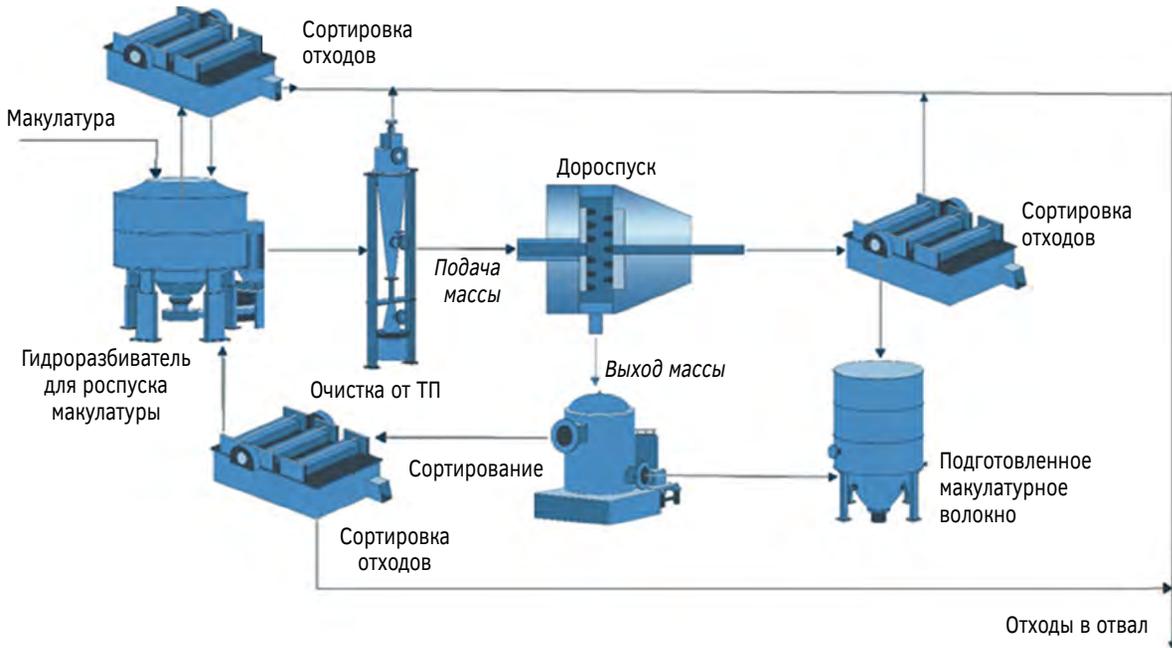


Рис. 14.20. Схема подготовки макулатурной массы для производства туалетной бумаги (здесь и далее «Очистка ТП» — очистка в центробежных очистителях от тяжелых примесей)

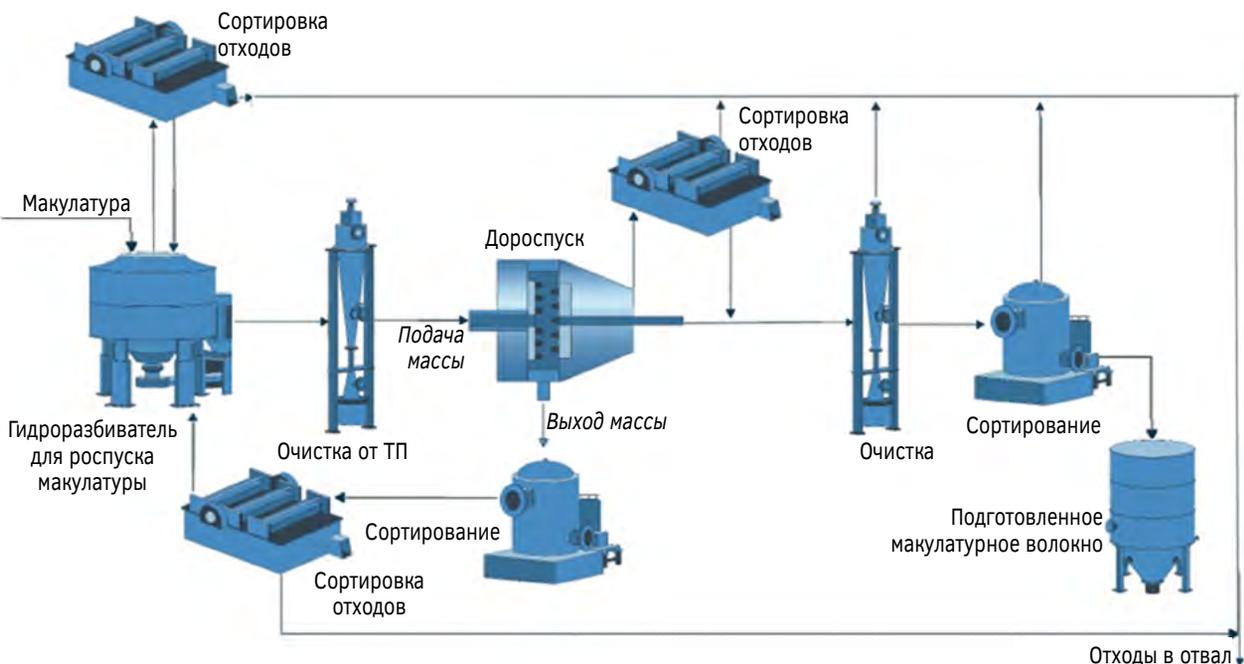


Рис. 14.21. Схема подготовки макулатурного волокна для производства упаковочных видов бумаги, покровного слоя картона и бумаги для гофрирования

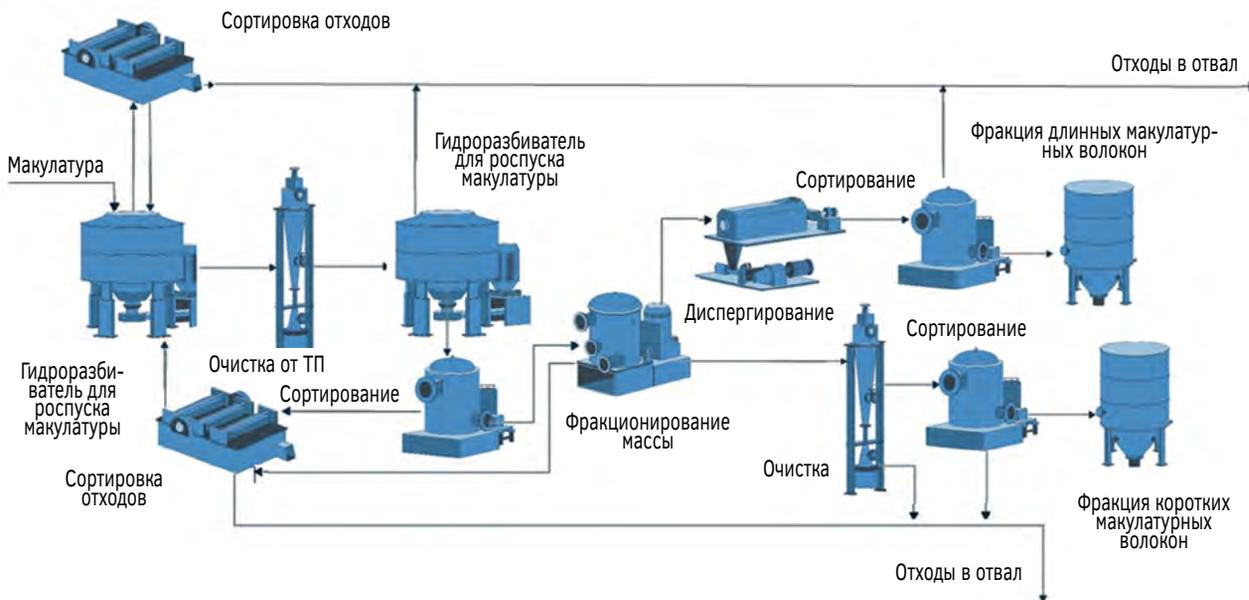


Рис. 14.22. Схема подготовки макулатурного волокна для производства картона и упаковочных видов бумаги с использованием фракционирования волокон на короткие и длинные волокна, чтобы максимально рационально использовать в разных видах продукции

Для производства писчепечатных видов бумаг используют 1 и 3 группы макулатуры и сложные технологические схемы, которые включают процессы облагораживания макулатурного волокна. Таких схем много, и поэтому их классифицируют по двум признакам: по типу использования технологии облагороженного волокна (промывка, флотация или комбинация промывки и флотации) и по числу технологических циклов с собственным водооборотом (от одного до трех). На рис. 14.23 в качестве примера представлена схема моноциклического производства облагороженного макулатурного волокна (ОМВ) из газетной макулатуры для производства газетной бумаги с использованием трехступенчатой промывки, а на рис. 14.24 — пример схемы с двумя технологическими циклами.

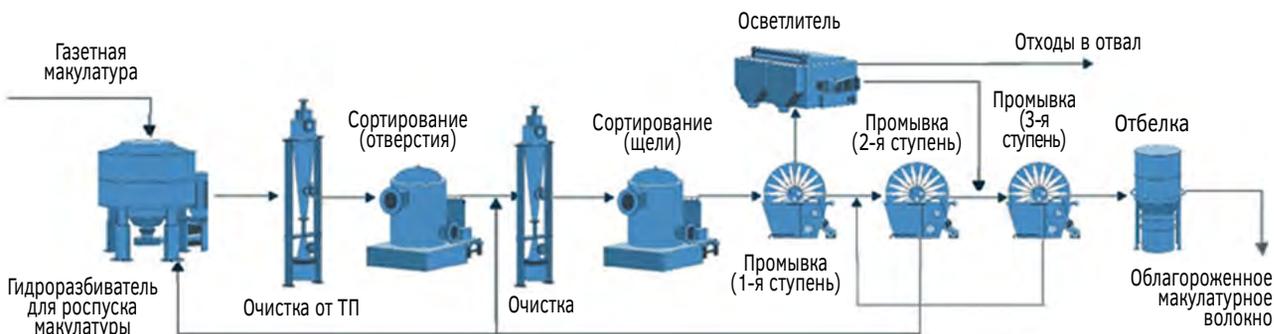


Рис. 14.23. Схема моноциклического производства ОМВ для газетной бумаги с использованием трехступенчатой промывки (завод Garden States, Нью-Джерси, США)

Схема производства вторичного волокна для писчепечатных видов бумаг из смешанной офисной макулатуры с тремя технологическими циклами представлена на рис. 14.25.

В представленной на рис. 14.25 схеме имеются две ступени диспергирования частиц краски и три ступени флотации, обеспечивающие эффективное удаление из массы частичек краски флексографической печати. Такое количество обработок макулатуры является отличительной особенностью технологии с тремя производственными циклами.

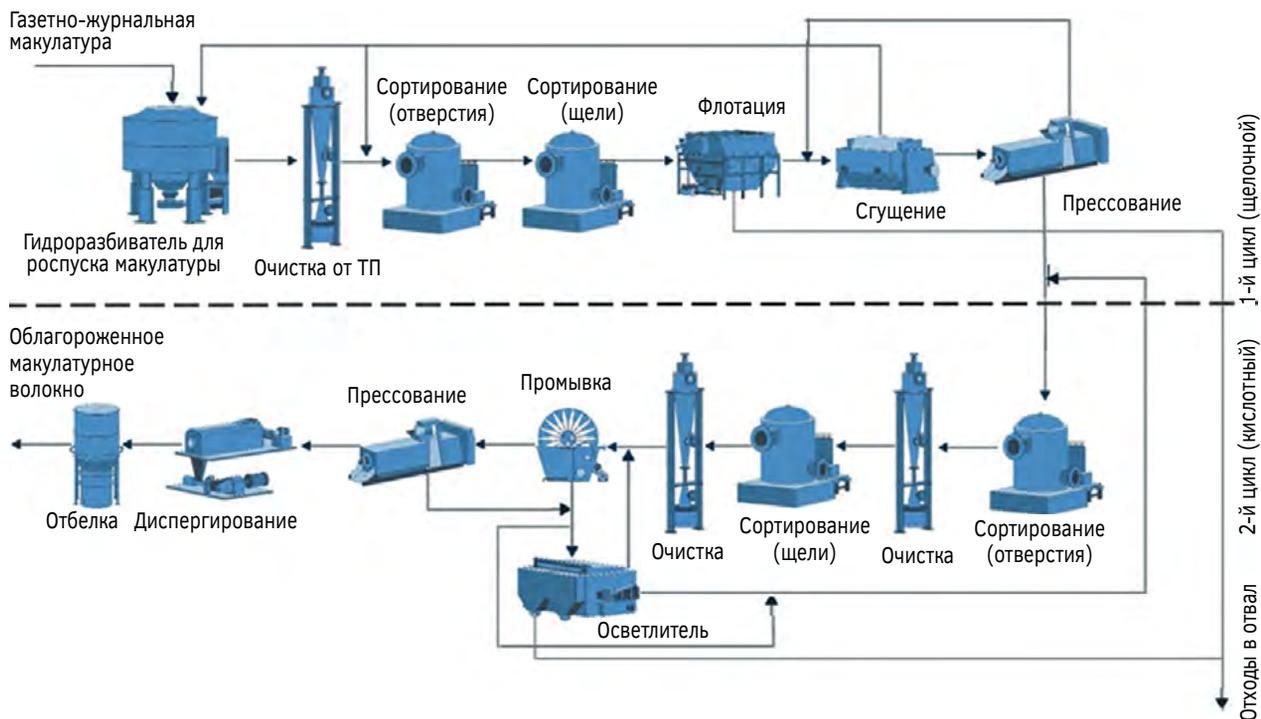


Рис. 14.24. Схема производства ОМВ для газетной бумаги с двумя технологическими циклами (завод Bridgewater Paper, Эллісмере Порт, Великобритания)

Следует отметить, что качество вторичного волокна, выделенного по данной технологии из смешанной офисной макулатуры, очень близко к качеству первичных волокон (механической массы и технической целлюлозы) для производства газетной и писчепечатных видов бумаг. В табл. 14.40 показано улучшение качества смешанной офисной макулатуры, которое достигается в процессе производства ОМВ по технологии на рис. 14.25, а в табл. 14.38 приведено сравнение качества ОМВ, ТММ, ДМД.

Показано, что ОМВ имеет потребительские свойства, аналогичные первичным волокнам. Однако для достижения экономической эффективности производства ОМВ необходимы потоки с высокой производительностью не менее 250 т/сут. Так, средняя производительность потоков на 24 заводах в Северной Америке составила 335 т/сут, а средние затраты на 1 т продукции — 441,9 долларов. Можно отметить, что такие высокие затраты на производство 1 т макулатурного волокна равны или даже выше уровня затрат на производство первичного волокна, а общая стоимость инвестиций, например, в завод «UK Paper» (рис. 14.25) составила 68 млн долларов, которая сопоставима со стоимостью отбелочного цеха первичного волокна аналогичной производительности.

Таблица 14.40. Улучшение показателей качества смешанной офисной макулатуры в процессе производства ОМВ по технологии с тремя производственными циклами

Показатель	Поступающая макулатура	Как улучшается качество волокна
Белизна, % ISO	59,7±5	Повышается на 22,8% до 80–85% ISO
Удельная площадь темных соринок (средняя чистота), мм ² /м ²	2872±1600	Снижается на 99,65%
Среднее содержание липких примесей, мм ² /кг	13580±11600	Снижается на 98,9% (остается менее 150 мм ² /кг)
Средняя зольность смешанной макулатуры, определенная при температуре 575° С, %	20,6±5	Снижается на 75,7% (остается менее 5%)

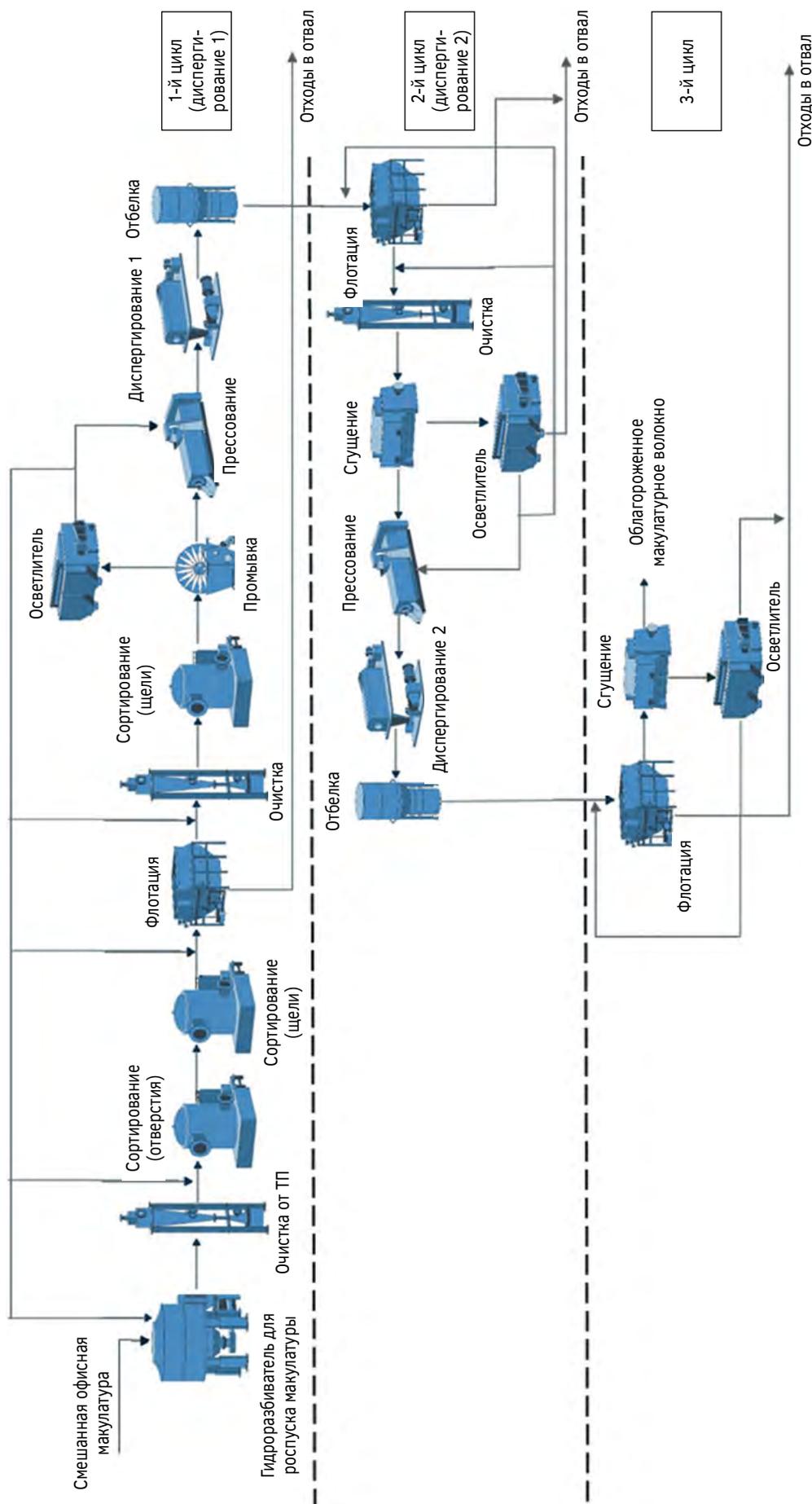


Рис. 14.25. Схема производства ОМВ для писчебумажных видов бумаж с двойной системой диспергирования и тремя технологическими циклами (завод «UK Rareg», Великобритания)

Таблица 14.41. Сравнительные характеристики качества ОМВ, полученного по технологии с двумя производственными циклами, и первичного волокна по технологии ТММ и ДМД для производства газетной бумаги

Показатель	ОМВ	ТММ	ДМД
Сорность, STFI	14	67	149
Белизна, % ISO	59	57	61
Плотность папки, кг/м ³	440	320	340
Прочность на разрыв, кН·м/кг	37	38	30
Индекс сопротивления раздиранию, Н·м ² /кг	7,6	8,6	4,5

РОЛЬ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В МИРОВОЙ ЭКОНОМИКЕ

К началу XXI в. целлюлозно-бумажная промышленность — одна из ведущих составляющих мирового лесопромышленного комплекса. В 2016 г. мировой объем производства продукции ЦБП составил порядка 440 млн т. Необходимо отметить, что 85% производства приходится на 10 стран, из которых США производят около 50 млн т, Бразилия и Канада — по 17,5 млн т. Другими крупными производителями являются Швеция, Финляндия, Китай, Япония, Россия, Индонезия и Чили — каждая с годовым объемом производства от 5 до 12 млн т.

Россия обладает огромной лесосырьевой базой, в которой только ежегодный прирост древесины составляет 980 млн м³. Для сравнения, в 2016 г. объем заготовки составил 214 млн м³, или 20% от ежегодного прироста. По расчетам Алексея Ивановича Киприанова, только из ежегодного прироста биомассы можно заготовить 500 млн м³ стволовой древесины, из 1/5 которой можно произвести технологической щепы, достаточной для выработки 20 млн т целлюлозы — это количество целлюлозы, которое планируется выработать в 2030 г. по прогнозу Минпромторга РФ. Несмотря на несметные лесные богатства, рубка леса происходит только на 22% лесопокрытой территории, там, где имеется транспортная доступность, и это определяет незначительное использование прироста древесины, нерациональную рубку леса и очень скромную долю России в глобальном лесном бизнесе на уровне 3%. Отметим, что в Европе за последние 10 лет при интенсивном развитии целлюлозно-бумажной промышленности площадь лесов даже увеличилась более чем на 44 000 км² (источник ФАО). Поэтому особое значение для интенсификации лесопользования и воспроизводства лесов имеет лесная инфраструктура, и прежде всего плотность лесных дорог, которых сегодня недостаточно. Это приводит к тому, что после заготовки леса порядка 40% биомассы в виде пней, порубочных отходов, сучьев и древесной зелени практически не используется. При этом суммарный вклад лесохимического производства в сельское хозяйство, парфюмерную, медицинскую, пищевую, теплоэнергетическую, металлургическую, космическую отрасли промышленности оценивается не менее 10 млрд долларов. Отсутствие переработки всей биомассы дерева является причиной низкой экономической эффективности работы ЛПК. Так, в 2016 г. общий объем выручки составил 1,4 трлн рублей (\$ 23 млрд), из которых выручка от химической переработки древесины 1,15 трлн рублей (\$ 19,2 млрд), или 84% выручки ЛПК. Вклад в ВВП страны составляет всего 0,5%, экспортный потенциал — 5–8 млрд долларов, в то время как, по оценкам экспертов, он должен достигать 20–30 млрд долларов, что сопоставимо с поставками нефти, газа и продукции сельского хозяйства.

ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ

С появлением в 1989 г. интернета как глобальной информационной системы эпоха бумаги как носителя информации начинает затухать и начинается эпоха электронных носителей информации. Однако при этом необходимо учитывать постоянное увеличение населения Земли, и если в 2017 г. оно составило 7,5 млрд, то к 2030 г. может достигнуть 10 млрд человек. Поэтому потребность в бумажно-картонной продукции к 2030 г. будет устойчиво расти в сегментах санитарно-гигиенических бумаг (+19,4 млн т), тары и упаковки (+81 млн т), в производстве целлюлозы для химической переработки. Всего, по данным RISI, ожидается рост продукции ЦБП с 440 млн т в 2016 г. до 570 млн т в 2030 г., или на 30%!

К 2030 г. в России возможно увеличение объемов производства ЦБП на 12,4 млн т: товарная целлюлоза — +11,0 млн т; СГИ — +0,6 млн т; упаковочная бумага и картон — +0,6 млн т; писчепечатные бумаги — +0,2 млн т. Экспорт целлюлозы вырастет на 10,6 млн т за счет увеличения производства товарной сульфатной целлюлозы на 12,5 млн т при сокращении производства сульфитной на 0,23 млн т. Реализация данных планов по развитию ЦБП России позволит увеличить налоговые поступления на 27 млрд рублей в 2030 г. и создать около 5 тыс. высокопроизводительных рабочих мест.

Возможно, будущие поколения специалистов не без иронии оценят ныне существующие производства технической целлюлозы, так же как сегодня мы оцениваем производство щелочи за счет сжигания лесов. Нет сомнения, что накопление новой суммы знаний во всех областях науки и техники даст импульс для смены существующей технологической парадигмы. В частности, одним из перспективных источников целлюлозы взамен древесины могут стать цианобактерии, обладающие генетической способностью синтезировать целлюлозу, которые будут «заняты» на производстве целлюлозы и других получаемых из дерева материалов, что сократит объем вырубки лесов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аввакумова, А. В. Отбелка целлюлозы для химической переработки / А. В. Аввакумова // Технология целлюлозно-бумажного производства : справ. матер. : в 3 т. — Т. 3, ч. 3. — СПб. : Изд-во С.-Петерб. гос. лесотех. акад., 2012. — 65 с.
2. Бегунов, Р. Ю. Экономические аспекты производства сульфитной целлюлозы / Р. Ю. Бегунов // Производство сульфитной целлюлозы — настоящее и будущее : науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 25–27 ноября 1992 г. — СПб., 1992. — С. 29–32.
3. Буйницкая, М. И. Научно-технический прогресс в целлюлозно-бумажной промышленности за рубежом (Обзорная информация) / М. И. Буйницкая // Целлюлоза, бумага и картон : экспресс-информация. — М. : ВНИИПИЭИлеспром, 1990. — Вып. 12. — 60 с.
4. Ефремов, Ю. Н. Актуальные направления сохранения сульфитного способа производства волокнистых полуфабрикатов в России / Ю. Н. Ефремов // Производство сульфитной целлюлозы — настоящее и будущее : науч.-практ. конф., СПб., 25–27 ноября 1992 г. / Санкт-Петербургское научно-техническое общество бумажной и деревообрабатывающей промышленности. — СПб., 1992. — С. 8.
5. Заварицкий, Д. А. Производство поташа / Д. А. Заварицкий. — Казань : Имп. Казан. экон. об-во, 1856. — 60 с.
6. Зонов, Н. С. Анализ состояния и направления совершенствования производства сульфитной целлюлозы (Обзорная информация) / Н. С. Зонов, Н. Е. Макуха, И. М. Ульянцева, М. И. Буйницкая // Целлюлоза, бумага и картон : экспресс-информация. — М. : ВНИИПИЭИлеспром, 1990. — Вып. 23. — С. 2–7.
7. Иванов, М. А. Смолистые вещества древесины и целлюлозы / М. А. Иванов, Н. Л. Коссович, С. С. Малевская, И. А. Нагородский, М. Н. Элиашберг. — М. : Лесн. пром-сть, 1968. — 349 с.
8. Использование макулатуры в производстве картона и бумаги // Waste.ru : отраслевой портал. — 2008. — URL: <https://www.waste.ru/modules/section/item.php?itemid=315> (Дата обращения: 24.10.2019). — Загл. с экрана.
9. История бумаги в России // Портал о бумаге [сайт]. — 2014. — URL: <http://uniq-paper.ru/istoriya-bumagi-v-rossii/> (дата обращения: 24.10.2019). — Загл. с экрана.
10. История бумажной отрасли в России // EuroPapier [официальный веб-сайт]. — URL: https://europapier.ru/interesno_dlya_vas/

- art149.html (дата обращения: 24.10.2019). — Загл. с экрана.
11. Карлссон, Х. Гид по волокну (Анализ волокна и его применение в ЦБП : справ. руководство) / Х. Карлссон ; пер. А. М. Кряжева. — Стокгольм : Kista snabbtryck, 2008. — 118 с.
 12. Киприанов, А. И. Комплексная переработка древесины / А. И. Киприанов // Лесопромышленный комплекс России XXI века : тезисы докл. Четвертого междунар. форума. 15–19 окт. 2002 г. — СПб., 2002. — С. 171–174.
 13. Кожова, О. М. Экологический мониторинг Байкала / О. М. Кожова, А. М. Бейм. — М. : Экология, 1993. — 342 с.
 14. Кожухова, А. Крупнейший целлюлозный завод в Германии / Анна Кожухова, Сергей Моосманн // ЛесПромИнформ. — 2006. — № 1 (32). — URL: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=1542> (дата обращения: 24.10.2019).
 15. Комаров, В. И. Классификация видов бумаги и картона / В. И. Комаров // Технология целлюлозно-бумажного производства : справ. матер. : в 3 т. — Т. 2, ч. 1. — СПб. : Политехника, 2003. — С. 7–10.
 16. Котласский целлюлозно-бумажный комбинат — 40 лет лидерства / [Под ред. Л. Клочковой]. — Архангельск : М'арт, 2001. — 550 с.
 17. Краткая история бумаги и картона на примере нескольких примечательных событий // РАО «Бумпром» [официальный веб-сайт]. — URL: <http://bumprom.ru/index.php?ids=278> (дата обращения: 24.10.2019). — Загл. с экрана.
 18. Кряжев, А. М. Давайте поспорим! / А. М. Кряжев, И. В. Вервейко // Журнал ЦБК. — 2013. — № 2. — С. 60–61.
 19. Кряжев, А. М. Леса в жизни человечества: вчера, сегодня, завтра / А. М. Кряжев, А. Д. Заварицкий, Е. Г. Белов // Аналитические обзоры литературной информации. — СПб. : ООО «Адвис плюс», 2017. — Вып. 1. — 75 с.
 20. Кряжев, А. М. Новые технические решения и поиск путей создания экологически безопасного производства беленых полуфабрикатов А. М. Кряжев, В. М. Васильев, В. И. Захаров, Ф. В. Шпаков, О. Л. Зарудская, А. В. Аввакумова // Целлюлоза. Бумага. Картон. — 1993. — № 4. — С. 16–19.
 21. Кряжев, А. М. Переработка макулатуры / А. М. Кряжев // Технология целлюлозно-бумажного производства : справ. матер. : в 3 т. — Т. 1, ч. 3: Переработка макулатуры. — СПб. : Политехника, 2004. — С. 161–311.
 22. Кряжев, А. М. Снижение вреда окружающей среде при внедрении НДТ / А. М. Кряжев, Т. В. Сокоорнова // Экология производства. — 2011. — № 2. — С. 32–36.
 23. Кряжев, А. М. Там, где ходят вверх ногами / А. М. Кряжев // Целлюлоза. Бумага. Картон. — 1996. — № 7–8. — С. 14–15.
 24. Лахтиков, Ю. О. Переход ЦБП к нормированию по принципам НДТ / Ю. О. Лахтиков // Горячие точки Баренцева региона : научно-практический семинар 28–31 января 2019. PITER INN г. Петрозаводск, Республика Карелия. — Петрозаводск, 2019. — 12 с.
 25. Минувя рубежи эпох, 1940–2010 : [об Архангельском ЦБК / ред.-сост. Н. А. Кошелева]. — Архангельск : Архангельский ЦБК, 2010. — 488 с.
 26. Неволин, В. Ф. Целлюлозно-бумажная промышленность России / В. Ф. Неволин // Proc. Pap-For'92 Conference, St. Petersburg, Russia, September 22–26, 1992. — Atlanta : TAPPI Press, 1992. — P. 49–60.
 27. Непенин, Н. Н. Технология целлюлозы. Производство сульфитной целлюлозы : в 3 т. Т. 1 / Н. Н. Непенин. — М. : ГОСЛЕСБУМИЗДАТ, 1956. — 748 с.
 28. Непенин, Ю. Н. Технология целлюлозы. Производство сульфатной целлюлозы : в 3 т. Т. 2 / Ю. Н. Непенин. — 2-е изд. — М. : Лесн. пром-сть, 1990. — 596 с.
 29. Объем отгруженных товаров собственного производства, выполненных по видам экономической деятельности в Российской Федерации (млн руб.) [электронный ресурс]. — 2018. — URL: http://www.gks.ru/free_doc/new_site/business/prom/otgruzka_CDE.xls (дата обращения: 25.10.2019).
 30. Они, Л. А. Анализ ошибок, допущенных в ходе внедрения отечественных систем регенерации отработанных щелоков на магниевом основании / Л. А. Они // Производство сульфитной целлюлозы — настоящее и будущее : науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 25–27 ноября 1992 г. — СПб., 1992. — С. 40–42.
 31. Отбелка целлюлозы. Монография ТАППИ № 10 / пер. В. М. Сперанского ; под ред. Ф. П. Комарова. — М. : Гослесбумиздат, 1957. — 325 с.
 32. Полвека в строю. Архангельский целлюлозно-бумажный комбинат (1940–1990). — Архангельск : Северо-Западное книжн. изд-во, 1990. — 124 с.
 33. Пономарев, О. И. Научно-технический прогресс в целлюлозно-бумажной промышленности за рубежом (Обзорная информация) / О. И. Пономарев, В. О. Шапиро, Ф. Д. Лялина // Целлюлоза, бумага и картон : экспресс-информация. — М. : ВНИИПИЭИлеспром, 1987. — Вып. 5. — 42 с.
 34. Пономарев, О. И. Научно-технический прогресс в целлюлозно-бумажной промышленности за рубежом (Обзорная информация) / О. И. Пономарев, Ф. Д. Лялина, В. О. Шапиро // Целлюлоза, бумага и картон : экспресс-информация. — М. : ВНИИПИЭИлеспром, 1990. — Вып. 12. — С. 2–9.
 35. Пономарев, О. И. Современное состояние производства термомеханической массы (Обзорная информация) / О. И. Пономарев, С. О. Апитс // Целлюлоза, бумага и картон : экспресс-информация. — М. : ВНИИПИЭИлеспром, 1979. — Вып. 18. — С. 1–2.
 36. Производство бумаги в России и СССР // Бузеон. Музей бумаги [сайт]. — URL: <http://www.buzeon.ru/history/russia> (дата обращения: 24.10.2019). — Загл. с экрана.

37. Производство термомеханической массы на Сыктывкарском ЛПК // Обзорная информация по информационному обеспечению общесоюзных научно-технических программ. — 1988. — Вып. 8. — 40 с.
38. Пузырев, С. С. Производство полуфабрикатов / С. С. Пузырев, Э. В. Виралайнен, Ю. А. Поляков // Технология целлюлозно-бумажного производства : справ. матер. : в 3 т. — Т. 1, ч. 3 : Технология механической (древесной) массы. — СПб. : Политехника, 2004. — С. 7–160.
39. Раскин, Н. М. Николай Леблан (1742–1806) / Н. М. Раскин // Пионеры машинной индустрии / ред. В. Ф. Миткевич. — М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1937. — С. 125.
40. Розен, Б. Я. Чудесный мир бумаги / Б. Я. Розен. — М. : Лесная пром-сть, 1986. — 127 с.
41. Самсонов, Н. Е. Сравнение бисульфатного и двухступенчатого методов варки древесины / Н. Е. Самсонов, М. Г. Мутовина, Т. А. Бондарева, А. И. Бобров // Производство сульфитной целлюлозы — настоящее и будущее : науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 25–27 ноября 1992 г. — СПб., 1992. — С. 9–10.
42. Смирнов, В. С. От елки до газеты / В. С. Смирнов. — М. : Учпедгиз, 1962. — 60 с. — URL: <http://www.nehudlit.ru/books/detail1186245.html> (дата обращения: 24.10.2019).
43. Смирнов, Р. Е. Производство сульфитных волокнистых полуфабрикатов : учеб. пособие / Р. Е. Смирнов. — СПб. : ГОУВПО СПбГТУРП, 2010. — 146 с.
44. Соловьев, Ю. И. История химии: развитие химии с древнейших времен до конца XIX в. : пособие для учителей / Ю. И. Соловьев. — М. : Просвещение, 1983. — 368 с.
45. Спангенберг, Р. Перспективы в области переработки макулатуры / Р. Спангенберг // Сб. информационных сообщений Второй международной науч.-техн. конф. PAP-FOR-94, 10–12 октября 1994 г. — СПб., 1994. — С. 166–183.
46. Страна Советов за 50 лет : сб. стат. матер. — М. : Статистика, 1967. — 352 с. — Ч. III : СССР — могущественная индустриальная держава. — URL: <http://istmat.info/node/16044> (дата обращения: 24.10.2019).
47. Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года : проект / Минпромторг России. — М., 2017. — 39 с. — URL: http://minpromtorg.gov.ru/common/upload/files/docs/Project_les2030_20102017.pdf (дата обращения: 25.10.2019 г.).
48. Татарчук, В. И. Производство сульфитной целлюлозы в мире и в России. Состояние и перспективы / В. И. Татарчук // Производство сульфитной целлюлозы — настоящее и будущее : науч.-практ. конф., СПб., 25–27 ноября 1992 г. — С. 1–4.
49. Фальк, Б. Полуфабрикаты высокого выхода из лиственной древесины / Б. Фальк, С. С. Пузырев, В. А. Жалина. — М. : ЦИНТИхимнефтемаш, 1991. — 60 с.
50. Фелкер, Э. Большая отбелка. Одна промышленная история / Эрнст Фелкер. — Ниферн : «Гебр. Бельмер ГмБХ», 1992. — 159 с.
51. ЦБП России: состояние и перспективы // ЛесПромИнформ. — 2013. — № 3 (93). — URL: <http://lesprominform.ru/jarchive/articles/itemshow/3136> (дата обращения: 08.11.2017).
52. Шпаков, Ф. В. Основные направления совершенствования технологии производства белевых полуфабрикатов в России на пороге XXI века / Ф. В. Шпаков, В. Ф. Неволин, А. М. Кряжев, А. А. Вдовин // Сб. пленарных докладов на пятой международной конференции ПАП-ФОР-98. 16–17 ноября 1998 г. — СПб., 1998. — С. 74–84.
53. Ягодин Б. А. Агрохимия / Б. А. Ягодин, Ю. П. Жуков, В. И. Кобзаренко. — 2-е изд. — СПб. : Лань, 2016. — 584 с.
54. Button, A. F. The World of Market Pulp / A. F. Button, H. Nanko, D. Hillman. — Atlanta (GA) : TAPPI Press, 2004. — 212 p.
55. Eriksson, T. P. The Development and Classification of Modern Deinking Systems / T. P. Eriksson, M. A. McCool // East European Paper Recycling Symposium. Symposium proceeding papers, 1997. — Warsaw, Poland, 1997. — DIII-1 — DIII-14.
56. Kriesel, J. Performance Fibers / J. Kriesel // Rayonier. Investor day. — 2011. — Sept. 22. — P. 35–62.
57. Liebergott, N., and Lierop, B. van. An overview of new developments in pulping & bleaching / N. Liebergott and B. van Lierop // Proc. Pap-For'92 Conference, St. Petersburg, Russia, September 22–26, 1992. — Atlanta (GA) : TAPPI Press, 1992. — P. 163–175.
58. Mulligan, D. B. Being competitive and profitable using small scale solution / D. B. Mulligan, R. E. Brauer // East European Paper Recycling Symposium, Symposium proceedings papers, 1997. — Warsaw, 1997. — DI-1 — DI-10.
59. Multi-Client Study. Outlook for Global Dissolving Pulp Market : PPI Magazine. — RISI Inc., 2011. — 149 p.
60. Paper peaks while pulp keeps coming // Pulp Paper Internat. — 1990. — Vol. 32, No 1. — P. 40–41.
61. Sabhash, Ch. Effluent minimization — a little water goes a long way / Chandra Sabhash // TAPPI Journal. — 1997. — Vol. 80, No 12. — P. 37–42.
62. Simons, D. Energy Cost Reduction in the Pulp and Paper Industry / D. Simons // PAPRICAN. — 1999, Nov. — 206 p.
63. Sjöström, E. Wood Chemistry. Fundamentals and Applications / E. Sjöström. — New York (NY) : Academic Press, 1981. — 223 p.
64. Slinn, R. G. Pulp and Paper Industry Trends in the United States and the World / R. G. Slinn // Proc. Pap-For'92 Conference, St. Petersburg, Russia, September 22–26, 1992. — Atlanta (GA) : TAPPI Press, 1992. — С. 1–20.
65. Wong, A. Sulphite, the new wave/ Al Wong // Proc. Pap-For'92 Conference, St. Petersburg, Russia, September 22–26, 1992. — Atlanta (GA) : TAPPI Press, 1992. — P. 233–240.
66. World Pulp and Paper Technology / Ed. F. Roberts. — London : Sterling Publ. Intl., Ltd., 1989.

Часть третья

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ



ВТОРИЧНЫЕ РЕСУРСЫ, ОБРАЗУЮЩИЕСЯ В СФЕРЕ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

Лазарь Яковлевич Шубов

Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики»,
старший научный сотрудник, доктор технических наук, профессор

Кирилл Дмитриевич Скобелев

Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики»,
начальник отдела развития отходов перерабатывающей отрасли

Дарья Антоновна Загорская

Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики»,
инженер

ВВЕДЕНИЕ

Виды вторичных ресурсов, образующихся в тепловой энергетике, зависят от множества факторов, главными из которых являются:

- вид используемого топлива;
- типы применяемых технологий.

Так, в теплоэнергетике образуются, например, отходы гипса при очистке дымовых газов с использованием установок обессеривания на карбонате кальция, нефтешламы при использовании жидких видов топлива. Однако самый распространенный вид отходов, который образуется в теплоэнергетике и считается ее «визитной карточкой», — золошлаковые отходы (ЗШО).

Золошлаковые отходы образуются при сжигании угля. При этом различают золу уноса (удаляется с дымовыми газами), топливные шлаки (удаляются из котла) и золошлаковые смеси. Нет четкого соотношения между количеством образовавшихся золошлаков и количеством сожженного угля, так как на это соотношение влияет множество факторов:

- конструкция аппаратуры, в которой сжигается уголь;
- тип угля, содержание в нем примесей;
- параметры подготовки угля к сжиганию и самого процесса сжигания, а также очистки образующихся дымовых газов;
- другие.

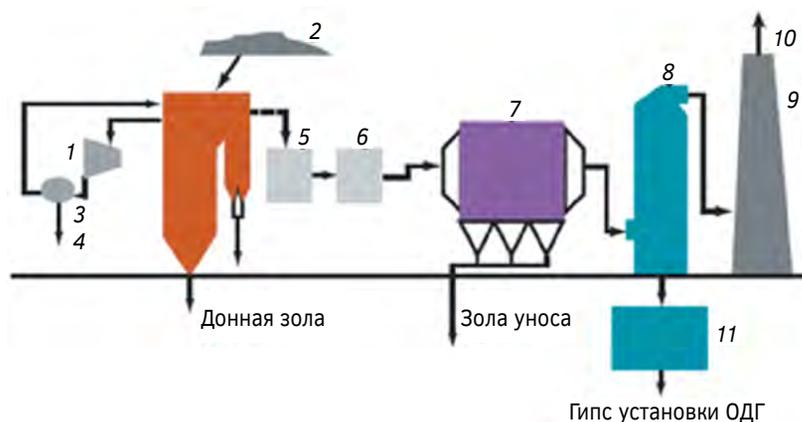


Рис. 15.1. Пример схемы парогенерации на угольной ТЭС:

- 1 — турбина; 2 — уголь; 3 — конденсатор; 4 — охлаждающая вода; 5 — система каталитического удаления оксидов азота; 6 — воздухоподогреватель; 7 — электроосадитель, или рукавный фильтр; 8 — установка обессеривания дымового газа (ОДГ); 9 — дымовая труба; 10 — дымовые газы; 11 — обработка и обезвоживание отходов установки ОДГ

Золошлаковые отходы образуются во многих странах мира. По состоянию на 2015 г. около 40% всей электроэнергии производилось путем сжигания угля.

ОБРАЗОВАНИЕ ОТХОДОВ В СФЕРЕ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

Использование угля в тепловой энергетике неизбежно приводит к образованию отходов. Это связано с тем, что топливный уголь обязательно содержит в своем составе негорючие минеральные примеси. От части этих примесей избавляются при обогащении угля (один из этапов процесса подготовки угля к сжиганию). Полное избавление от минеральных примесей невозможно, а глубокое обогащение энергетических углей нецелесообразно экономически. Так, в ГОСТ 32347–2013 «Угли каменные и антрациты Кузнецкого и Горловского бассейнов для энергетических целей. Технические условия» регламентируемая зольность (содержание негорючих примесей) может составлять от 13 до 40%, а средняя — 25%, то есть из тонны угля образуются в среднем как минимум 250 кг золы. Не весь уголь сгорает, и в зависимости от технологического процесса сжигания часть угля остается в золе в виде недожога (потери массы при прокаливании). Высокая степень недожога невыгодна для электростанций, но полностью дожигать уголь тоже не получается — для зол разных видов углей нормативные показатели по недожогу составляют от 2 до 24%, причем значения 2–3% зачастую достигаются путем предварительной подготовки золы уноса к использованию.

В развитых странах наблюдается тенденция к отказу от угля в пользу других источников энергии — перевод угольных тепловых электростанций на газ и т. п. Тем не менее даже в США угольная энергетика генерирует 30% всей электроэнергии страны, производя более 100 млн т ЗШО. Однако около 60% этих ЗШО перерабатывается, на чем электростанции зарабатывают около 23 млрд долларов.

В РФ ежегодно образуются 25–30 млн т ЗШО, а объем накопленных отходов оценивается в 1,5–2 млрд т. Несмотря на богатые запасы природного газа, обширные водные ресурсы и развитую атомную энергетiku, можно с уверенностью говорить, что угольная энергетика в РФ играет важную роль, охватывая примерно пятую часть в структуре электрогенерации.

Согласно ЦДУ ТЭК на сегодняшний день в мировой угольной промышленности наметилась настораживающая тенденция к сокращению объемов добычи угля.

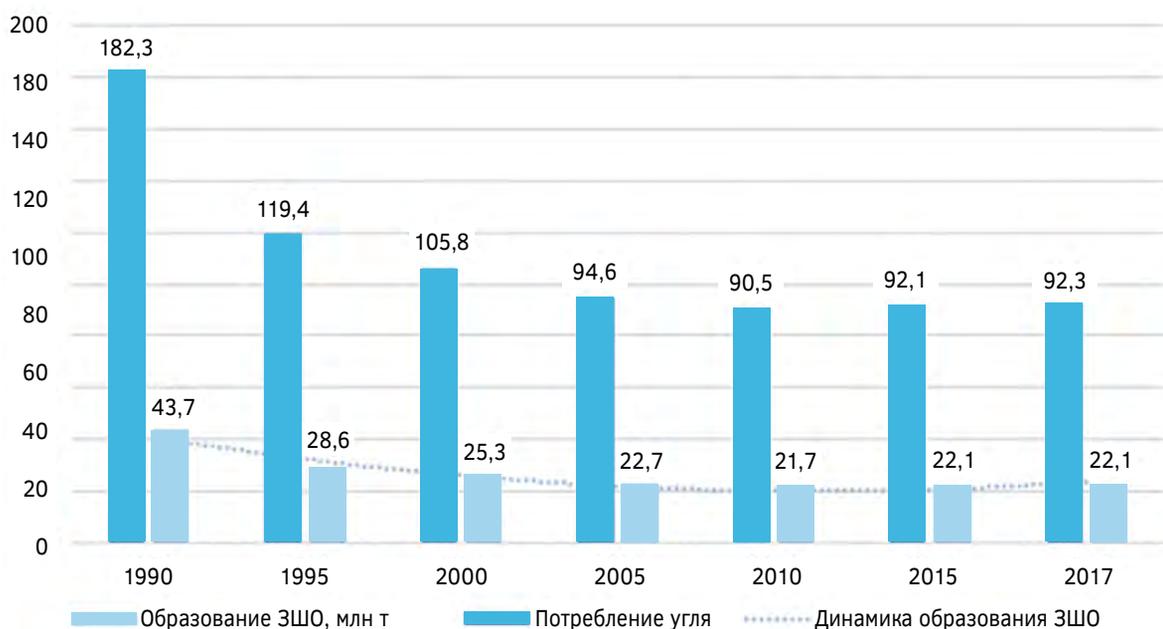


Рис. 15.2. Потребление угля и образование ЗШО, млн т (график исторического развития отрасли)

В 2013 г. мировая угольная отрасль достигла своего исторического максимума — объем добытого угля в мире в указанном году составил 8270,9 млн т. И с этого момента угольное производство на международной арене начало постепенно сокращаться. В 2017 г. оно составило уже 7727,3 млн т (–543,6 млн т к уровню 2013 г., или 93,4%). Причем эта тенденция отмечена практически во всех регионах мира, за исключением Южной Америки и Африки, где за этот период производство осталось на прежнем уровне и даже несколько выросло.

Зольность угля варьируется в интервале от 4,3% (Бачатский угольный разрез) до 50% (шахта «Большевик»).

Если взять среднюю зольность угля по всем разрезам (24%), то мы можем подсчитать количество образованной золы относительно потребленного угля.

Исходя из этой статистики несложно предположить, что потребление угля, а следовательно, накопление ЗШО постепенно снижается.

ТЕХНОГЕННЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ НАКОПЛЕННЫХ ОТХОДОВ В СФЕРЕ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

Техногенные образования золошлаковых отходов называются золошлакоотвалами, возможно и раздельное накопление золы и шлаков в золоотвалах и шлакоотвалах. На территории РФ под золошлакоотвалы отчуждено порядка 28 тыс. га земель, что сопоставимо с территорией таких городов, как Иркутск, Красноярск или Томск.

В зависимости от устройства системы золошлакоудаления образуются намывные (гидравлические) или насыпные («сухие») отвалы. Каждая система имеет свои преимущества и недостатки, например, «сухой» отвал дороже с точки зрения капитальных затрат, но из него проще извлекать ЗШО для дальнейшей переработки, а для организации пневматического сухого удаления золы с одного энергоблока Каширской ГРЭС мощностью 300 МВт нужны 40 дорогих насосов и клапанов. В РФ в основном используются системы гидравлического золоудаления.

Сухой золошлакоотвал обычно обустраивают на месте выработанного карьера или других малоценных земель. С поверхности участка снимается верхний слой плодородного грунта (если он имеется) и на его место кладут фильтрационную подушку из крупнозернистого и прочного материала (шлак или щебень). Для предотвращения пыления зола увлажняется до 15%. При послойной утрамбовке золы и закрытии ее грунтом образуется массив, практически непроницаемый для вод, что исключает возможность вымывания вредных компонентов. Эксплуатационные затраты на такое складирование золы на 40–50% выше, чем в случае влажного золоудаления, но капитальные вложения на сооружение сухого золошлакоотвала в 5–6 раз меньше. Золошлакоотвал для влажного золоудаления включает территорию намыва свежего материала и отстойный пруд — водоем, в котором осаждаются мелкие фракции золы, а верхний слой обеззоленной воды используется для нужд тепловых электростанций (ТЭС). Золошлакоотвалы классифицируются согласно рельефу, на котором они обустраиваются (пойменные, косогорные, овражные и др.) и ограничиваются дамбами. Все типы отвалов, кроме овражных и котлованных, делаются секционированными для более равномерного заполнения и разработки отвалов. Это также позволяет наращивать дамбы, увеличивая итоговую емкость золоотвала.

По расчетам, произведенным в советское время, сухое золоудаление существенно дороже влажного. Однако ЗШО с сухого золоотвала значительно проще пустить на переработку, чем с влажного. В настоящее время оценку затрат стоит проводить по конкретным ТЭС. Например, при выходе ЗШО до 100 тыс. т/год при расстоянии до отвала менее 1–2 км сухое золошлакоудаление и организация сухого золоотвала выгоднее, чем традиционное влажное золоудаление.

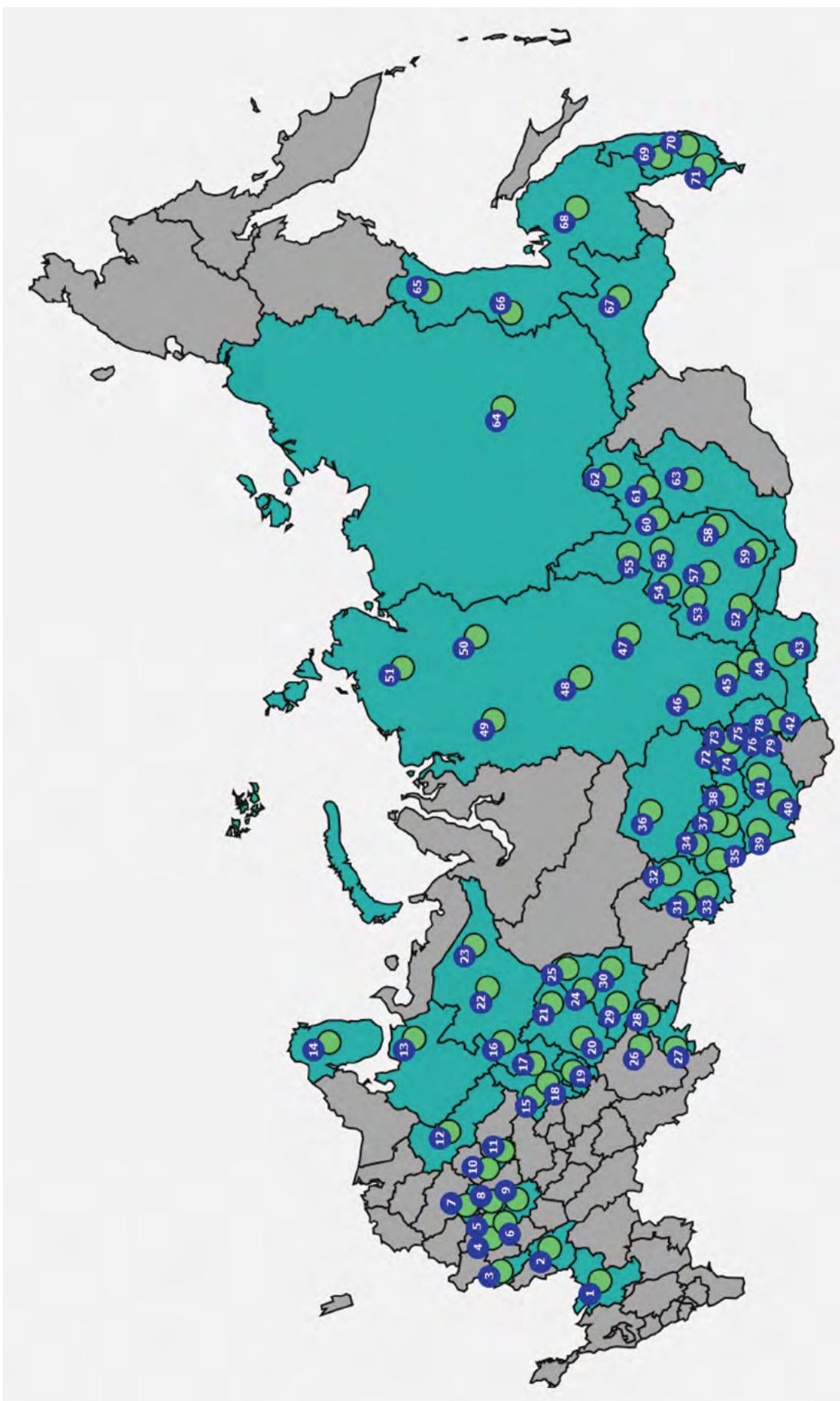


Рис. 15.3. Карта-схема расположения электростанций и золошлакоотвалов Российской Федерации

№ на карте	Наименование электростанции и ЗШО (если указано)	№ на карте	Наименование электростанции и ЗШО (если указано)	№ на карте	Наименование электростанции и ЗШО (если указано)	№ на карте	Наименование электростанции и ЗШО (если указано)	№ на карте	Наименование электростанции и ЗШО (если указано)
1	Новочеркасская ГРЭС, золоотвал № 2	21	Закамская ТЭЦ-5	42	Абаканская ТЭЦ, золоотвал № 2	62	Иркутская ТЭЦ-6		
2	Воронежская ТЭЦ-1, ТЭЦ-2	22	Воркутинская ТЭЦ-2	43	Кызылская ТЭЦ, золоотвал № 1	63	Гусиноозерская ГРЭС		
3	Курская ТЭЦ-1, ТЭЦ-2, ТЭЦ СЗР	23	Интинская ТЭЦ	44	Красноярская ТЭЦ-1, Шумковский золоотвал	64	Нерюнгринская ГРЭС		
4	Новомосковская ГРЭС	24	Нижегуртинская ГРЭС	45	Красноярская ТЭЦ-2, золоотвал № 1 и № 2	65	Хабаровская ТЭЦ-1, золоотвал № 3		
5	Черепетская ГРЭС, золоотвал № 4	25	Рефтинская ГРЭС, золоотвал № 2	46	Красноярская ТЭЦ-3, золоотвал № 1	66	Хабаровская ТЭЦ-3, золоотвал № 2		
6	Алексинская ГРЭС	26	Троицкая ГРЭС, Бобровский золоотвал (старый)	47	Минусинская ТЭЦ	67	Благовещенская ТЭЦ		
7	Каширская ГРЭС	27	Южноуральская ГРЭС, золошлакоотвал № 2	48	Канская ТЭЦ, золоотвал № 2	68	Комсомольская ТЭЦ-2		
8	ТЭЦ-22	28	Аргаяшская ТЭЦ, золоотвал № 1 и № 2	49	Назаровская ГРЭС, золоотвал № 3	69	Приморская ГРЭС, золоотвал № 2		
9	Рязанская ГРЭС	29	Верхнетатайская ГРЭС, золоотвал № 2	50	Красноярская ГРЭС-2	70	Артемовская ТЭЦ		
10	Ивановская ТЭЦ-2	30	Серовская ГРЭС, золоотвал № 3	51	Березовская ГРЭС	71	Владивостокская ТЭЦ-2		
11	Ивановская ТЭЦ-3	31	Омская ТЭЦ-2	52	Ново-Иркутская ТЭЦ	72	Беловская ГРЭС, золоотвал № 2		
12	Череповецкая	32	Омская ТЭЦ-4	53	Ново-Иркутская ТЭЦ — Шелеховский филиал (ТЭЦ-5)	73	Томь-Усинская ГРЭС, золоотвал № 2		
13	Северодвинская ТЭЦ-1, золоотвал № 1	33	Омская ТЭЦ-5	54	Иркутская ТЭЦ-9	74	Ново-Кемеровская ТЭЦ, золошлакоотвал № 2		
14	Апатитская ТЭЦ	34	Новосибирская ТЭЦ-2	55	Иркутская ТЭЦ-9 (участок № 1)	75	Кемеровская ГРЭС, золошлакоотвал № 2		
15	Кировская ТЭЦ-4	35	Новосибирская ТЭЦ-3	56	Иркутская ТЭЦ-10	76	Кузнецкая ТЭЦ		
16	Воркутинская ТЭЦ-1	36	Томская ГРЭС-2 (старый и новый золоотвалы)	57	Иркутская ТЭЦ-11	78	Кемеровская ТЭЦ, золошлакоотвал № 2		
17	Кировская ТЭЦ-3	37	Новосибирская ТЭЦ-4, золоотвал № 2	58	Иркутская ТЭЦ-12	79	Южно-Кузбасская ГРЭС, золоотвал № 2		
18	Кировская ТЭЦ-5		Барабинская ТЭЦ	59	Ново-Зиминская ТЭЦ				
19	Ижевская ТЭЦ-2	38	Новосибирская ТЭЦ-5, золоотвал № 2	60	Ново-Зиминская ТЭЦ — Зиминский участок (ТЭЦ-3)				
20	Чайковская ТЭЦ-18	39	Бийская ТЭЦ	61	Усть-Илимская ТЭЦ				

ПОТЕНЦИАЛ ОТХОДОВ ОТРАСЛИ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КАЧЕСТВЕ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ

Золошлаковые отходы состоят в основном из неорганических (минеральных) примесей угля. Большая часть этих примесей представлена оксидами алюминия и кремния, в частности, их различными сочетаниями (каолин, мусковит, алюмосиликаты и др.). Также присутствуют оксиды железа и кальция, в меньшей степени — оксиды магния и титана. В следовых количествах (иногда меньше грамма на тонну) содержатся, в зависимости от свойств сжигаемого угля, практически все элементы таблицы Менделеева: щелочные и щелочноземельные металлы, различные переходные металлы (в том числе ценные, редкие и редкоземельные) и некоторые количества неметаллов (например мышьяк, бор, сера). В разнообразии и неоднородности составов ЗШО и кроется одна из главных трудностей их переработки. Трудно грамотно выстроить процесс комплексной переработки ЗШО без их тщательного предварительного анализа. Расчет экономических показателей процесса с использованием ЗШО разных участков одного отвала может приводить к разным результатам. Тем не менее даже следовые количества ценных и редких металлов обычно оправдывают трудоемкие процессы их извлечения¹.

Зачастую комплексная переработка не представляет интереса, и для таких случаев существуют простые технологии подготовки ЗШО к использованию в строительстве, обычно заключающиеся в дожигании остаточного угля, дроблении, сушке и разделении на фракции по крупности частиц. После этого ЗШО можно либо отправить в процесс производства стройматериалов, либо непосредственно на строительство, например, для основания автомобильной дороги.

ЭВОЛЮЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В СФЕРЕ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

Зарождение технологий переработки золошлаковых отходов можно отнести к глубокой древности. Сходный по составу и свойствам вулканический пепел широко использовался в строительстве в Древнем Риме. Построенные в ту эпоху Пантеон, Колизей, а также многочисленные дороги и акведуки сохранились до наших дней, простояв уже более двух тысяч лет. Более того, термин «пуццолан» (пуццолановые свойства — это явление, при котором известь и некоторые алюмосиликаты реагируют в присутствии воды при обычных температурах с набором прочности) происходит от названия итальянского города Поццуоли, считающегося родиной технологии получения бетона с использованием вулканического пепла.

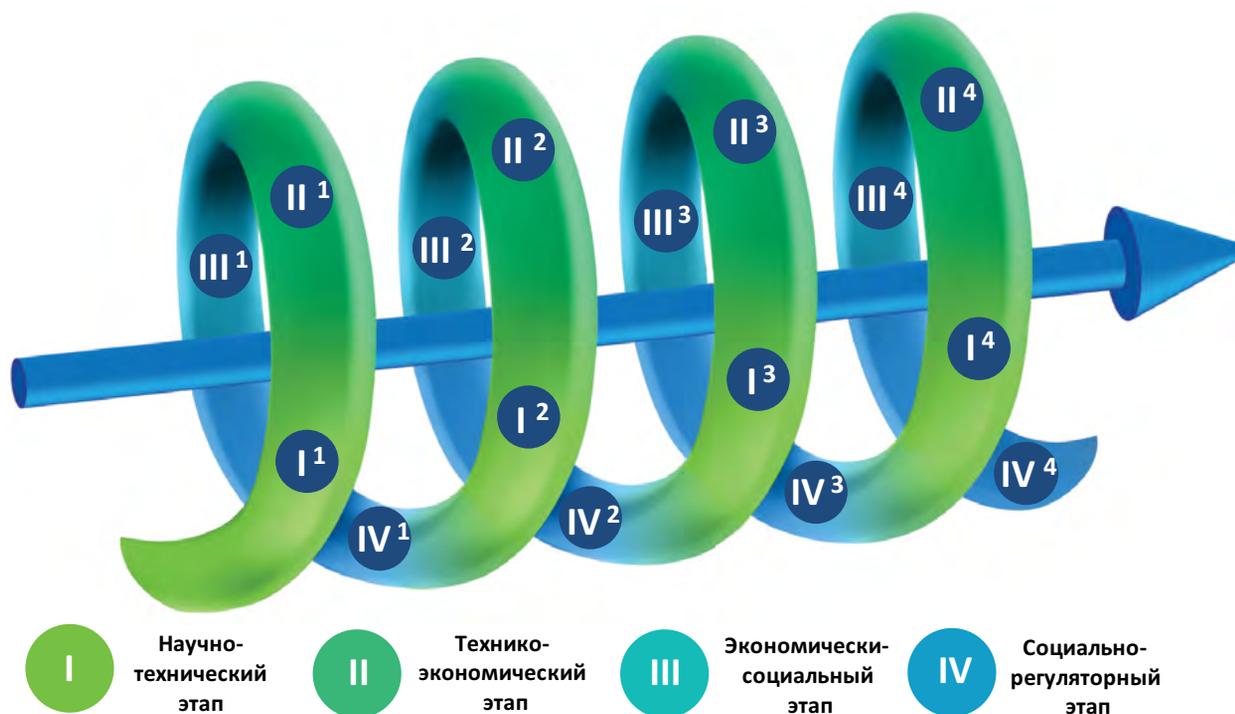
Первые попытки переработки ЗШО в современном их понимании не могли быть предприняты ранее 1882 г. — когда в Лондоне по проекту Томаса Эдисона была построена первая угольная ТЭС (Edison Electric Light Station). Имеются упоминания о том, что впервые ЗШО были применены в качестве добавки к цементу в 1914 г., хотя первое значимое научное исследование, относящееся к этому, было проведено в 1937 г.

Использование ЗШО в бетонах наблюдается в США в начале 1930-х гг. Первое документированное применение бетона с высоким содержанием золы уноса относится к 1942 г. — проведение ремонтных работ по заделыванию протечки дамбы Гувера. В период с 1948 по 1952 г. была построена дамба Hungry Horse, для чего было использовано почти 2,5 млн м³ бетона, 35% цемента в его составе было заменено на золу уноса (120 тыс. м³).

С тех пор происходило постепенное развитие теории и методов применения ЗШО в бетоне, цементе и других строительных материалах, и количество проектов, в которых использованы, казалось бы, бесполезные отходы, превышает сотни: от серийного выпуска кирпичей,

¹ Например, извлечение редкоземельных металлов из ЗШО теоретически способно дать толчок развитию высокотехнологичной отрасли и снизить зависимость РФ от импорта этих металлов.

которое наблюдается даже в бедных странах (Намибия) до строительства целых метрополи-
тепов (Вашингтон, США) и рекордных по высоте небоскребов (Бурдж-Халифа, Дубай²).



- I¹** — первые исследования по применению ЗШО (1910–1930)
- II¹** — первые значимые применения ЗШО ввиду технико-экономической целесообразности (при использовании ЗШО как компонента бетона при ремонте дамбы Гувера руководствовались тем, что это позволит сократить расход сырья) (1930–1950)
- III¹** — первое обобщение простых технологий в форме справочников и книг, распространение применения этих технологий (1950–1960)
- IV¹** — введение первичных регуляторных мер (НТД, рекомендации по применению ЗШО) (1960–1980)
- I²** — развитие аспектов простых технологий (высокопрочный бетон)
- II²** — переход к усовершенствованной технологии вследствие ее экономической эффективности;
- III²** — крупномасштабные и знаковые проекты с применением технологии (Бурдж-Халифа, Дубай)
- IV²** — регуляторные меры, устанавливающие обязательность применения этих технологий

(в 2015 г. муниципалитет Дубая постановил, что при строительстве всех новых зданий часть используемого портландцемента должна быть заменена на ЗШО)

Параллельно предыдущему витку:

- I³** — научные исследования комплексных технологий переработки ЗШО
- II³** — формирование научно-технической базы (патенты, лабораторные исследования, коммерческие предложения)
- III³** — реализация единичных проектов
- IV³** — формирование НТД и НПА

Прогноз:

- I⁴** — технико-экономическая оптимизация комплексных технологий посредством научных изысканий
- II⁴** — апробация этих технологий в единичных проектах
- III⁴** — систематизация опыта и новые проекты реализации
- IV⁴** — актуализация НТД и НПА

Рис. 15.4. Эволюция технологий отрасли переработки ЗШО

² В настоящее время ведется строительство еще более высокого небоскреба в городе Джидда (Саудовская Аравия), высота которого составит 1007 м, среди компонентов бетона имеется зола уноса (высокопрочный бетон с прочностью 85 МПа используется для строительства фундамента и нижней части здания).

ПЕРЕРАБОТКА ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ С УЧЕТОМ МЕЖОТРАСЛЕВЫХ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ

ЗШО являются ценным вторичным ресурсом. На практике это означает, что ТЭС или золошлакоотвал при ТЭС может служить источником сырья для других отраслей.

Так, основной областью применения ЗШО является строительство. Некоторые применения (отсыпка земляного полотна автомобильной дороги или возведение насыпей) требуют минимальной подготовки, а засыпка траншей и пустот золошлаковыми наполнителями обычно означает необходимость хотя бы разделить ЗШО на фракции по крупности с удалением влаги.

ЗШО используются как сырье для производства строительных материалов. Наиболее распространены варианты производства кирпичей и бетона с добавками ЗШО, но можно также изготавливать различные вяжущие, цементные смеси, получать различные виды керамики. Отдельно стоит отметить использование ЗШО в составе высокопрочных бетонов, уже упомянутое выше — в этом случае ЗШО не имеет альтернатив по соотношению «цена–свойства».

Также необходимо подчеркнуть, что применение ЗШО в строительстве или производстве строительных материалов ведет к снижению выбросов диоксида углерода. Бетон, модифицированный с помощью ЗШО, так и вовсе способен поглощать диоксид углерода из воздуха. Специфические свойства бетона с добавкой ЗШО особенно полезны при использовании его в морской воде, так как ЗШО обеспечивает повышение устойчивости бетона к хлоридам и биологическому воздействию.

Применение ЗШО потенциально способно преобразовать отрасль строительства и производства стройматериалов. Уже в 2018 г. заявлялось, что для реализации нацпроектов не хватает природных ресурсов. Использование ЗШО в качестве их замены позволяет решить проблему нехватки материалов и одновременно снизить социальное напряжение.

Часто при алюминиевых заводах, требующих большого количества энергии ввиду особенностей процесса получения алюминия (см. статью о технологиях производства алюминия), имеются собственные ТЭС. ЗШО являются потенциальным источником алюминия — в зависимости от типа угля содержание оксида алюминия Al_2O_3 варьируется в пределах от 10 до 40%. Даже в случае присутствия всего 20% оксида алюминия общий эффект от выделения алюминия из ЗШО электролизом считается положительным, а стоимость получаемого алюминия снижается в 2–4 раза по сравнению с традиционным способом.

Но на этом потенциал реализации ЗШО при алюминиевом заводе не ограничивается. Существуют технологии, позволяющие провести совместную переработку ЗШО с отходами производства глинозема — красными шламами. Смесь красных шламов и ЗШО можно применить для получения целого ряда продукции: стекло- и пенокерамики, кирпичей и тротуарной плитки, цеолитов.

Все вышеперечисленные виды переработки ЗШО довольно просты в исполнении. Как только выстраивается такая система обращения с ЗШО, стоит задуматься о комплексных методах переработки. Дело в том, что ЗШО, как упомянуто выше, может содержать практически всю таблицу Менделеева. В различных условиях интерес могут вызывать самые разные элементы: например, в США задались вопросом извлечения урана из ЗШО, а в ЗШО Дальнего Востока отмечено наличие золота, серебра и металлов платиновой группы. Определенный интерес представляют редкоземельные элементы (РЗЭ). Привлекательность извлечения РЗЭ из ЗШО связана с тем, что концентрации РЗЭ в практически всех источниках сырья довольно малы, и технологически процесс извлечения РЗЭ из ЗШО не сильно отличается от традиционных способов добычи РЗЭ. Необходимо отметить, что остаток после извлечения также требует переработки, например по вышеописанным сценариям.

Определенный потенциал представляет и идея разделения ЗШО на основные фракции: угольную, магнитную (железосодержащую) и алюмосиликатную (содержит оксиды алюминия и кремния). Продукты разделения можно пустить в дальнейшую переработку: угольную фракцию вернуть на ТЭС, алюмосиликатную фракцию разделить на глинозем (глина)

и кремнезем (песок), а железосодержащую фракцию отправить на металлургическую переработку с возможностью получения целого ряда продукции (ферросплавы, чугун, сталь).

ЗШО используется в аграрной сфере в качестве удобрения, но такое использование требует тщательного изучения состава ЗШО. Это связано с тем, что в ЗШО содержатся тяжелые элементы, попадание которых в почву опасно: свинец, никель, марганец, цинк, мышьяк, ртуть, хром и т. д. Из почвы эти элементы выщелачиваются в грунтовые воды, что способно отравить источник питьевой воды на местности. Также отдельную опасность представляет присутствие в ЗШО радиоактивных элементов и органических загрязнений. Тем не менее использование ЗШО в качестве удобрения имеет много преимуществ: повышается содержание питательных элементов в почве, улучшается структура почвы и контролируется pH почвы.

Распространено применение ЗШО для засыпки отработанных шахт и карьеров. Аналогично приведенному выше примеру применение ЗШО может привести к загрязнению прилегающих участков почвы и грунтовых вод тяжелыми элементами, и для таких случаев предпочтительно использовать старые ЗШО из золошлакоотвалов, из которых с высокой долей вероятности уже были вымыты эти элементы. Также для подобных применений характерно потребление больших объемов ЗШО, и, как было показано выше, это довольно ценный вторичный ресурс — с одним миллионом тонн, сбрасываемым в шахту, теряется, например, около 100 тысяч тонн алюминия (при содержании в ЗШО 20% оксида алюминия).

СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЛЯ СРАВНЕНИЯ. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Технология переработки ЗШО — это совокупность методов (операций) воздействия на ЗШО с целью повышения их качества как вторсырья (стабилизация состава, крупности, извлечение ценных и удаление нежелательных компонентов) для последующей переработки и утилизации (в соответствии с требованиями ресурсосбережения, нормативной и технической документации, табл. 15.1).

Направления переработки и утилизации ЗШО многообразны.

Наиболее перспективное направление масштабного использования топливных отходов как термически обработанного и несгораемого продукта (содержит реакционноспособные оксиды кальция, кремния и алюминия, обладает низкой теплопроводностью) — использование в строительной индустрии (практикуется с 30-х гг. XX в.) и в дорожном строительстве:

- заполнители для тяжелых и легких бетонов;
- материал для изготовления силикатного кирпича;
- материал для приготовления строительных растворов;
- кремнеземистый компонент для ячеистых бетонов;
- вяжущие для ячеистых бетонов;
- минеральный порошок в асфальтобетонные смеси;
- мелкий заполнитель для конструкционно-теплоизоляционного бетона (лимитируется содержание недожога, SO₃, крупность зерен, удельная поверхность);
- использование для производства цемента (в соответствии с требованиями к глинистому компоненту шихты);
- производство искусственных пористых заполнителей (аглопоритовый гравий и щебень, глиноземный керамзит);
- использование в производстве стеклокристаллических материалов строительного и технического назначения: производство шлакоситаллов, стеклошлаковых облицовочных плиток, коррозионно-стойких стеклошлакоэмалевых покрытий металлов (толщина покрытий 300–500 мкм);
- изготовление пеностекла (обладает огнестойкостью и низкой теплопроводностью).

Повышение качества ЗШО как вторсырья требует применения методов обогащения. Доказана (табл. 15.2) технологическая возможность (и экономическая целесообразность)

Таблица 15.1. Использование ЗШО для производства бетонов, силикатных изделий, строительных растворов, асфальтобетонных смесей

Вид сырья, направление использования	Нормативный документ	Основные показатели качества получаемой продукции
<p><i>Золошлаковая смесь ТЭС</i> Заполнитель для тяжелых и легких бетонов, материал для изготовления силикатного кирпича</p>	<p>ГОСТ 25592-91, ГОСТ 379-95, ГОСТ 25592-91</p>	<p>Характеризуется зерновым составом, насыпной плотностью, химическим составом, влажностью, устойчивостью структуры зерен шлака; лимитируется: содержание и размер зерен шлака, зерновой состав, удельная поверхность, влажность, насыпная плотность, химический состав, засоряющие примеси</p>
<p><i>Шлаки ТЭС</i> Заполнители для бетонов (щебень и песок из шлаков), материал для изготовления силикатного кирпича (песок шлаковый), материал для приготовления строительных растворов (щебень и песок шлаковые)</p>	<p>ГОСТ 26644-85, ГОСТ 379-95, ГОСТ 26644-85, ГОСТ 28013-89, ГОСТ 26644-85</p>	<p>Шлаки разделяют по виду сжигаемых углей и плотности; щебень и песок из шлака характеризуются зерновым составом; ограничиваются: насыпная плотность, химический состав, устойчивость структуры, морозостойкость, наличие посторонних примесей</p>
<p><i>Зола-унос ТЭС сухого отбора</i> Компонент для изготовления бетонов и строительных растворов, материал для изготовления силикатного кирпича</p>	<p>ГОСТ 25818-91, ГОСТ 379-95, ГОСТ 25818-91</p>	<p>Применяют антрацитовые, каменно-угольные, буроугольные кислые золы (содержание СаО до 10%) и буроугольные основные золы (содержание СаО свыше 10%); ограничиваются: влажность, удельная эффективная активность естественных радионуклидов; золы должны обеспечивать в смеси с цементом равномерность изменения объема</p>
<p><i>Зола ТЭС гидроудаления</i> Компонент для изготовления тяжелых и легких бетонов и строительных растворов</p>	<p>ГОСТ 28013-89, ТУ 34-31-16502</p>	<p>Содержание зерен шлака не более 10%, размер зерен шлака не более 5 мм, влажность не более 40%, насыпная плотность в сухом состоянии не более 1300 кг/м³, содержание SO₃ не более 1%, СаО+MgO в золе не более 10%, в шлаке не более 1%</p>
<p><i>Зола-унос ТЭС</i> Кремнеземистый компонент для ячеистых бетонов</p>	<p>ГОСТ 25485-89, ОСТ 21-60-84</p>	<p>SiO₂ не менее 45%, СаО не более 10%, R₂O не более 3%, SO₃ не более 3%; обычно пригодны золы каменных углей и антрацита</p>
<p><i>Зола ТЭС (высокоосновная)</i> Вязущие для ячеистых бетонов</p>	<p>ГОСТ 25485-89, ОСТ 21-60-84</p>	<p>СаО не менее 40%, в т. ч. свободной СаО не менее 16%, SO₃ не более 6%, R₂O не более 3,5%; обычно пригодны золы горючих сланцев и бурых углей</p>
<p><i>Зола-унос, золошлаковые смеси ТЭС</i> Минеральный порошок в асфальтобетонные смеси</p>	<p>ГОСТ 9128-84</p>	<p>Лимитируются: зерновой состав, пористость, коэффициент водостойкости смеси порошка с битумом, показатель битумности, содержание водорастворимых соединений, свободной СаО, влажность</p>
<p><i>Золошлаковые отходы ТЭС</i> Строительство автодорог, оснований аэродромов, укрепление обочин</p>	<p>ГОСТ 8267-93, ГОСТ 25607-94</p>	<p>Щебень регламентируется: по зерновому составу, прочности, морозостойкости, содержанию зерен пластинчатой и игольчатой формы, содержанию пылевидных и глинистых частиц, глины в комках и содержанию дробленых зерен в щебне из гравия, устойчивости структуры против распада</p>

разделения ЗШО методами обогащения на магнитную фракцию (выход 5–10% по массе, содержание железа 35–50%, германия 10 г/т, крупность 80% –0,1+0,05 мм), легкую микросферсодержащую фракцию (выход 2%, плотность 0,3–0,5 г/см³) и немагнитную фракцию (выход 90%, крупность 70% –0,05 мм), которая является исходным сырьем для использования в стройиндустрии (и других областях техники).

Основные технологические показатели, характеризующие процесс обогащения (сепарации) — извлечение, содержание и выход. Они позволяют оценить эффективность данной технологии и сравнить ее с другими технологическими процессами, решающими аналогичные задачи.

Извлечение ϵ компонента в продукт сепарации — отношение массы компонента в продукте сепарации к массе компонента в исходном.

Содержание β компонента в продукте сепарации — отношение массы компонента в продукте сепарации к массе продукта сепарации.

Выход γ продукта сепарации — отношение массы продукта сепарации к массе исходного материала.

Показатели сепарации обычно выражаются в процентах (реже — в долях единицы).

Продукты и полупродукты (фракции отходов), выделяемые при сепарации (в частности ЗШО) должны удовлетворять действующим стандартам и требованиям конкретного производства, куда они будут направлены.

Например.

В процесс сепарации поступила 1 т ЗШО. Материал транспортируется конвейерной лентой, над которой установлен подвесной магнитный сепаратор.

В 1 т ЗШО содержится 5% железа (50 кг).

В результате магнитной сепарации получена магнитная фракция массой 25 кг; она представлена черными металлами — 20 кг и примесями — 5 кг.

Определяем показатели сепарации:

$$\epsilon = \frac{20 \text{ кг}}{50 \text{ кг}} \times 100 \% = 40 \% ; \beta = \frac{20 \text{ кг}}{25 \text{ кг}} \times 100 \% = 80 \% ; \gamma = \frac{25 \text{ кг}}{1000 \text{ кг}} \times 100 \% = 2,5 \%$$

Численные значения технологических показателей позволяют судить об эффективности процесса сепарации (хорошие это показатели или плохие).

Извлечение: достигнутый показатель 40%, максимально возможный 100%. Большие потери черного металла (в виде магнитной фракции) свидетельствуют о том, что одностадийная магнитная сепарация недостаточна, требуется по крайней мере еще одна стадия, установка еще одного сепаратора по ходу процесса.

Содержание: 80% — высокое; по ГОСТу содержание железа в магнитной фракции — не менее 97% (следовательно, требуется перечистка).

Выход: 2,5% — показатель неплохой; он демонстрирует, что удалось отделить часть соединений железа от основной массы отходов (выход хвостов магнитной сепарации 100% – 2,5% = 97,5%; в случае ЗШО хвосты магнитной сепарации — оптимизированный продукт для использования в стройиндустрии).

Выбор лучшей технологии среди нескольких, решающих однотипные задачи, определяется аналитической оценкой технологических показателей (в первую очередь сравниваются показатели извлечения).

Выбор технологии определяется составом и свойствами исходного сырья, а также экологическими и экономическими параметрами. Монотехнология приемлема для переработки вторсырья однородного состава. Поскольку ЗШО — многокомпонентная система, важнейший показатель — комплексность использования сырья.

Под комплексной следует понимать такую переработку (использование) вторсырья, которая обеспечивает максимально полное его вовлечение в хозяйственный оборот и материально-энергетическую утилизацию как техногенного сырья.

Таблица 15.2. Многоотоннажные источники вторичного сырья — принципы технологического подхода

Вид источника вторсырья, краткая характеристика и запасы	Основные направления переработки и утилизации	Принципиальные технологии (технологические операции)	Основное оборудование
Золотошлаковые отходы теплоэнергетики (ЗШО) образуются при сжигании угля на ТЭС. Среди ЗШО различают золуноос (продукт газоочистки), шлак и золошлаковую механическую смесь.	Получение цементного клинкера и высококачественного цемента	Оптимизация состава ЗШО (удаление железа), смешивание компонентов (известняк, глина, ЗШО), обжиг (1400°С), охлаждение цементного клинкера и его выдерживание на складе с последующим измельчением (с добавкой гипса и ЗШО) и образованием цемента	Барабанные печи (обжиг), шламовые бассейны (операция смешивания), оборудование для измельчения
Зола-унос — тонкодисперсный материал (выход класса —50 мкм ~60%, класса +90 мкм ~10%).	Получение прочного силикатного кирпича (сырье — высококальциевые золы, содержащие недожога более 15%)	Удаление из ЗШО недожога: двухступенчатое сжигание угля с гранулированием продукта первой ступени; термообработка гранул золошлаковой смеси при 900°С (выжигание угольных частиц); получение силикатного кирпича	Тарельчатый гранулятор, сушильный конвейер, печь кипящего слоя
Основные компоненты ЗШО SiO ₂ и Al ₂ O ₃ ; специфический продукт — микросферы (поплавки тонкостенные сферические образования — с гладкой и перфорированной поверхностью); в виде микросфер присутствуют редкие и редкоземельные металлы.	Обогащение ЗШО с выделением недожога и утилизацией продуктов обогащения	Грохочение, гидроциклонирование и гидроклассификация, фильтрование песков гидроциклонирования (обезвоженный уголь — на сжигание); пески гидроклассификатора после обезвоживания используются в гражданском строительстве	Вакуум-фильтр, гидроклассификатор
ЗШО содержат до 25% недожога; допускается содержание недожога не более 5%.	Обогащение ЗШО с выделением магнитной фракции и недожога	Электродинамическая сепарация (извлечение черных металлов) и флотация (извлечение недожога). Уголь направляется на сжигание, хвосты флотации используются в производстве стройматериалов.	Электродинамический сепаратор, флотомашины
В отвалах накоплено около 2 млрд т ЗШО, ежегодно образуется ~20 млн т.	Извлечение золота из ЗШО (содержание золота 80 мг/т)	Гидроциклонирование (обезвоживание), грохочение, обогащение в центробежном поле класса — 6 мм (обогажительная чаша, имеет футеровку с рифлями)	Гидроциклон, дуговой грохот, центробежный сепаратор
Уровень утилизации ЗШО в РФ ~10% (для примера: в Финляндии 90%).	Комплексное обогащение ЗШО с получением: – алюминосиликатов (для производства стройматериалов и использование в качестве вяжущих); – железосодержащих концентратов (утяжелитель суспензии); – углерода (недожог)	Грохочение, дробление, гидроциклонирование, винтовая сепарация, гидроклассификация, сгущение, электродинамическая сепарация	Производство в РФ: валковая дробилка, электродинамический сепаратор, винтовой сепаратор. Производство в Германии: виброобезвоживатель, гидроклассификатор, сгуститель
Осложняющий фактор масштабной утилизации ЗШО — нестабильный состав	Комплексное обогащение ЗШО с извлечением микросфер, недожога, РЗЭ, магнитной фракции и алюминосиликатного концентрата	Грохочение, отстаивание, классификация по крупности, магнитная сепарация, флотация	—

Для достижения максимальной эффективности (минимизации затрат и экологического риска) требуется, как правило, реализация комбинационных технологических решений (на базе объединения разных технологий); к комплексному следует также отнести использование одних отходов для обезвреживания и эффективной переработки других.

Комплексной переработке целесообразно подвергать техногенное сырье сложного вещественного состава (например, ЗШО), представляющего собой гетерогенную смесь органоминеральных компонентов, отличающихся крупностью, технологическими свойствами, степенью возможного вредного воздействия на окружающую среду и влияющие на показатели качества продуктов, получаемых при переработке ЗШО.

Объединяющим процессом в схеме комплексной переработки ЗШО (и других источников вторсырья) является обогащение. Управляя качеством и количеством ЗШО на основе их разделения на несколько несмешивающихся потоков методами обогащения можно не только извлечь ценные компоненты, но и улучшить качество ЗШО как вторсырья (в частности стабилизировать состав) и оптимизировать процессы их последующей переработки (производство бетона, цемента, вяжущих и др.).

В идеале (при соответствующем составе техногенного сырья) сепарация ЗШО как подготовительная операция в технологиях их комплексной переработки должна обеспечить извлечение из потока ЗШО важнейших ценных компонентов:

- глинозем Al_2O_3 ;
- соли — сульфат алюминия и хлорид алюминия (пользуются спросом в целлюлозно-бумажной и деревообрабатывающей промышленности);
- железо (вредная примесь в технологии цемента);
- недожог (несгоревший уголь, содержание лимитируется ГОСТ);
- микросферы (на основе их использований прочность легкого бетона повышается в три раза, увеличивается срок службы бурильного оборудования);
- металлы (редкоземельные, благородные и др.);
- хвосты сортировки — обогащенная фракция, готовая к применению.

Показатель комплексности использования ЗШО — число извлеченных компонентов и их извлечение в кондиционные продукты.

Рациональная комплексная переработка ЗШО (рис. 15.5–15.16) обеспечивает извлечение и получение ресурсноценных компонентов и материалов и соблюдение действующих норм утилизации вторсырья.

Использование небогатых ЗШО приемлемо в технологиях захоронения ЗШО (пересыпной материал), в дорожном строительстве, при рекультивации территорий, при ликвидации возгораний гидролизного лигнина на объектах их складирования.

Упрощенная блок-схема оптимизации состава ЗШО перед их переработкой и утилизацией (решение задач ресурсосбережения и экологической безопасности) представлена на рис. 15.17.

Общая степень утилизации ЗШО (выход вторсырья) — это количество ресурсов, выделенных для вторичного использования, выраженное в процентах от общего количества ЗШО, вовлеченных в переработку.

Продукты обогащения имеют более высокий спрос, чем исходные ЗШО.

При использовании обезжелезненной (немагнитной) фракции ЗШО потребление цемента снижается на 30% (данные Кузбасского государственного технического университета и Института теплофизики СО РАН). Использование ЗШО в производстве цемента без удаления железосодержащих соединений приводит к снижению механических и технологических показателей цемента, к увеличению времени схватывания.

Другая нежелательная примесь в ЗШО — недожог. Используемые разные технологии удаления из ЗШО недожога (флотация, гравитация и др.) сравниваются по технологическим показателям: выход угольного концентрата (обычно ~20%) и содержание в нем углерода (обычно 70–80%); содержание угля в хвостах — не более 5%. Выбирается технология с более высокими показателями.

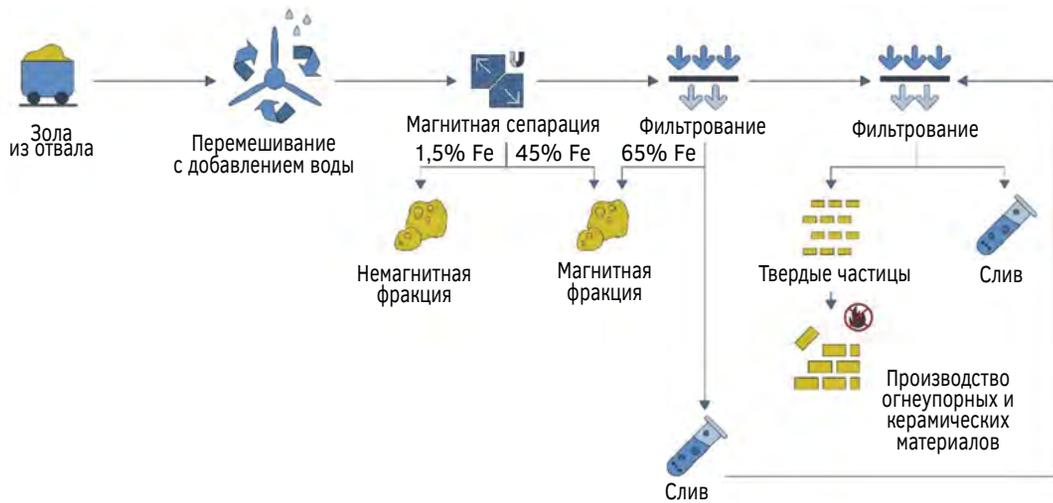


Рис. 15.5. Схема процесса полупромышленной установки обогащения золошлаковых отходов с извлечением магнитной фракции (Дальневосточный регион)



Рис. 15.6. Технологическая схема процесса опытно-промышленной установки обогащения золошлаковых отходов ТЭЦ-22 (Москва) с выделением недожога

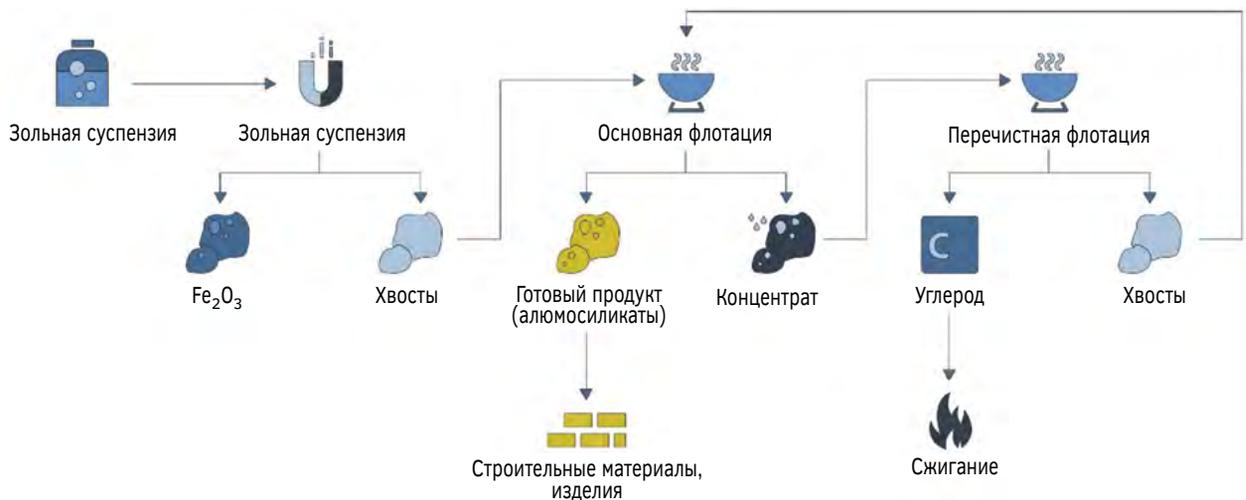


Рис. 15.7. Технологическая схема обогащения золы с выделением магнитного концентрата и недожога



Рис. 15.8. Технологическая схема извлечения золота из ЗШО



Рис. 15.9. Технологическая схема обогащения ЗШО с выделением магнитной фракции, алюмосиликатного концентрата и недожога

Для сравнения технологий утилизации обогащенных ЗШО в стройиндустрии и дорожном строительстве (производство бетона, цемента, вяжущих, цементного клинкера и др.) изучаются строительно-технологические свойства новой продукции: прочностные характеристики, нормализуемая влажность, сыпучесть, неслеживаемость и др.³

³ **Бетон** — один из важнейших строительных материалов, представляет собой искусственный каменный материал, получаемый в результате затвердения уплотненной смеси вяжущего вещества, воды, заполнителей и в некоторых случаях добавок. Основной показатель качества бетона — прочность при сжатии (по ней устанавливается марка бетона).

Вяжущие вещества — строительные материалы для изготовления бетонов и растворов. Минеральные вяжущие вещества при смешивании с водой образуют пластичную массу, приобретающую затем камневидное состояние. Их делят на гидравлические (способны твердеть и сохранять прочность на воздухе и в воде, например портландцемент) и воздушные (твердеют и сохраняют прочность только на воздухе, например гипс, известь).

Цемент — гидравлическое вяжущее вещество; при смешивании с водой образует пластичную массу, приобретающую затем камневидное состояние.

Портландцемент — гидравлическое вяжущее вещество, получают совместным измельчением клинкера и гипса (иногда некоторых добавок).

Клинкер цементный — полупродукт, получаемый в виде гранул при обжиге тонкоизмельченной смеси известняка с глиной; применяется в производстве цемента.

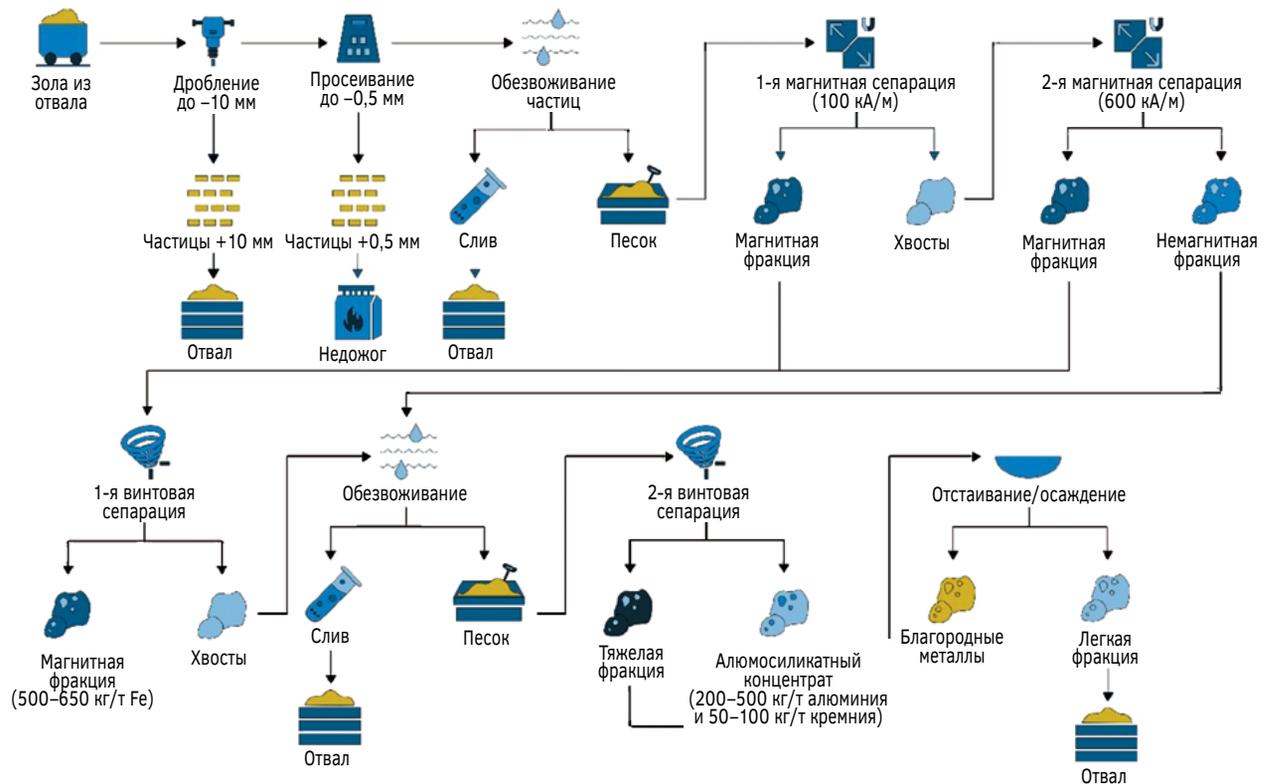


Рис. 15.10. Технологическая схема комплексного обогащения ЗШО⁴ (выделение недожога, магнитной фракции, алюмосиликатного концентрата и благородных металлов)

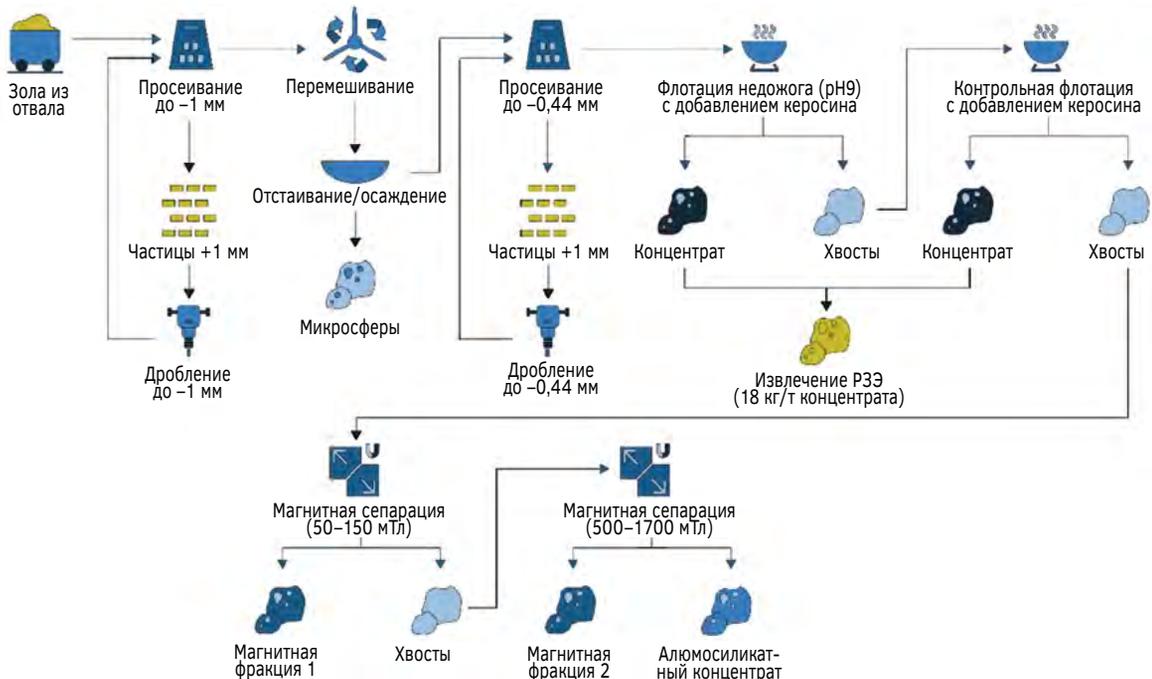


Рис. 15.11. Технологическая схема полупромышленных испытаний обогащения ЗШО с извлечением ценных компонентов (микросферы, магнитная фракция, алюмосиликатный концентрат, редкоземельные элементы совместно с недожогом)

⁴ Железосодержащий и алюмосиликатный концентраты содержат по 4 кг/т титана.

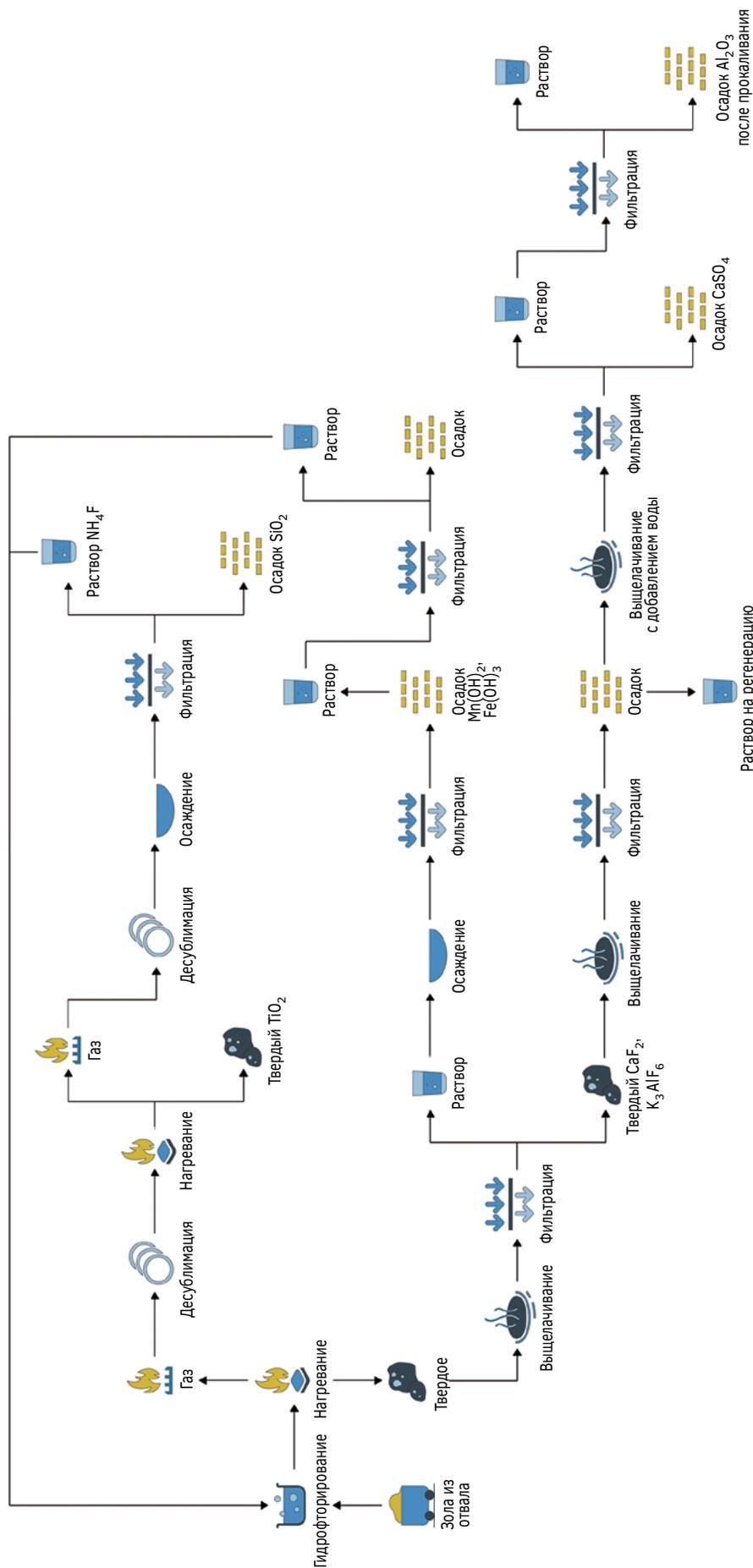


Рис. 15.12. Технологическая схема химической переработки ЗШО (выделение диоксидов титана, кремния и алюминия, сульфата кальция)

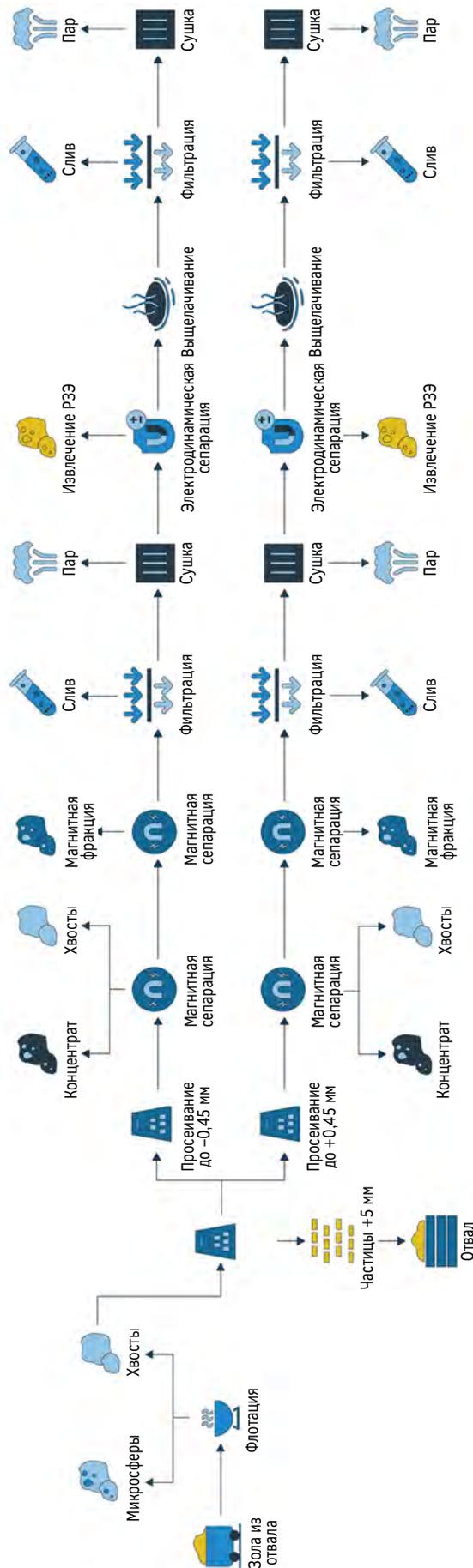


Рис. 15.13. Технологическая схема комплексной переработки ЗШО (извлечение микросфер, магнитной фракции, получение концентрата редких и редкоземельных элементов)

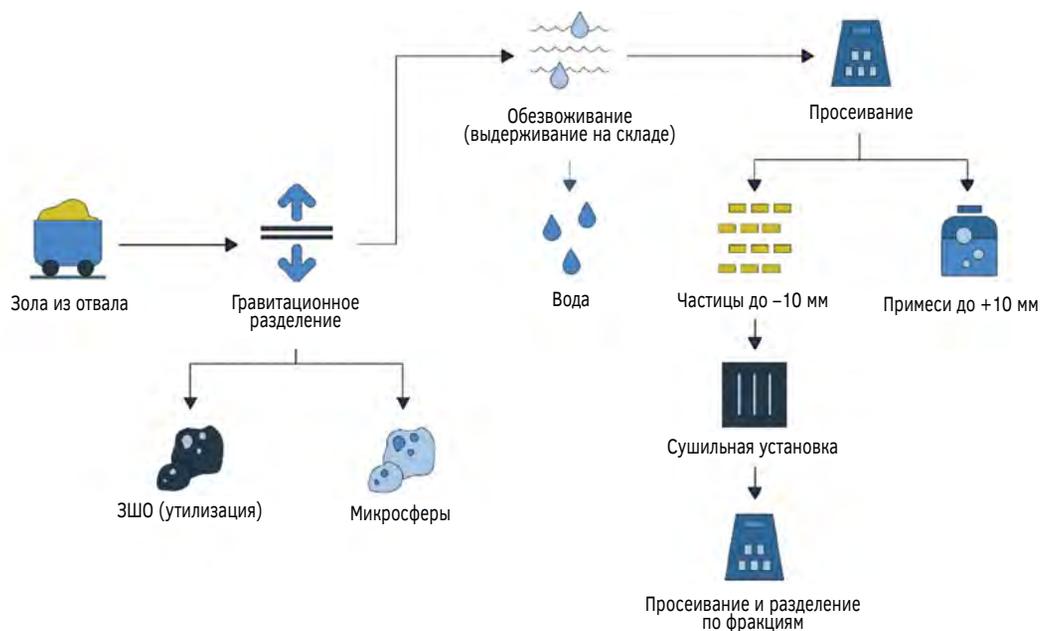


Рис. 15.14. Технологическая схема извлечения из ЗШО микросфер

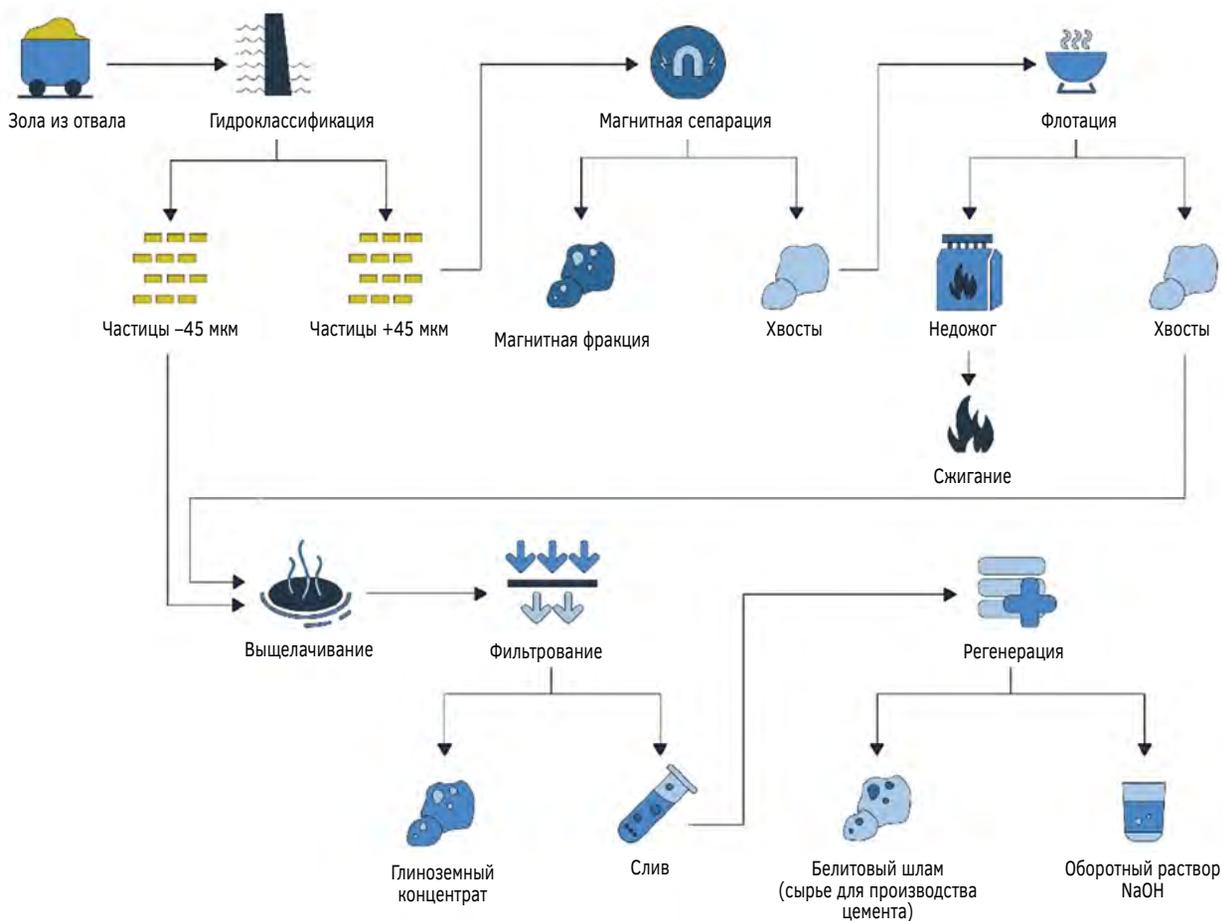


Рис. 15.15. Технологическая схема переработки ЗШО с извлечением недожога, глинозема, белитового шлама и магнитной фракции

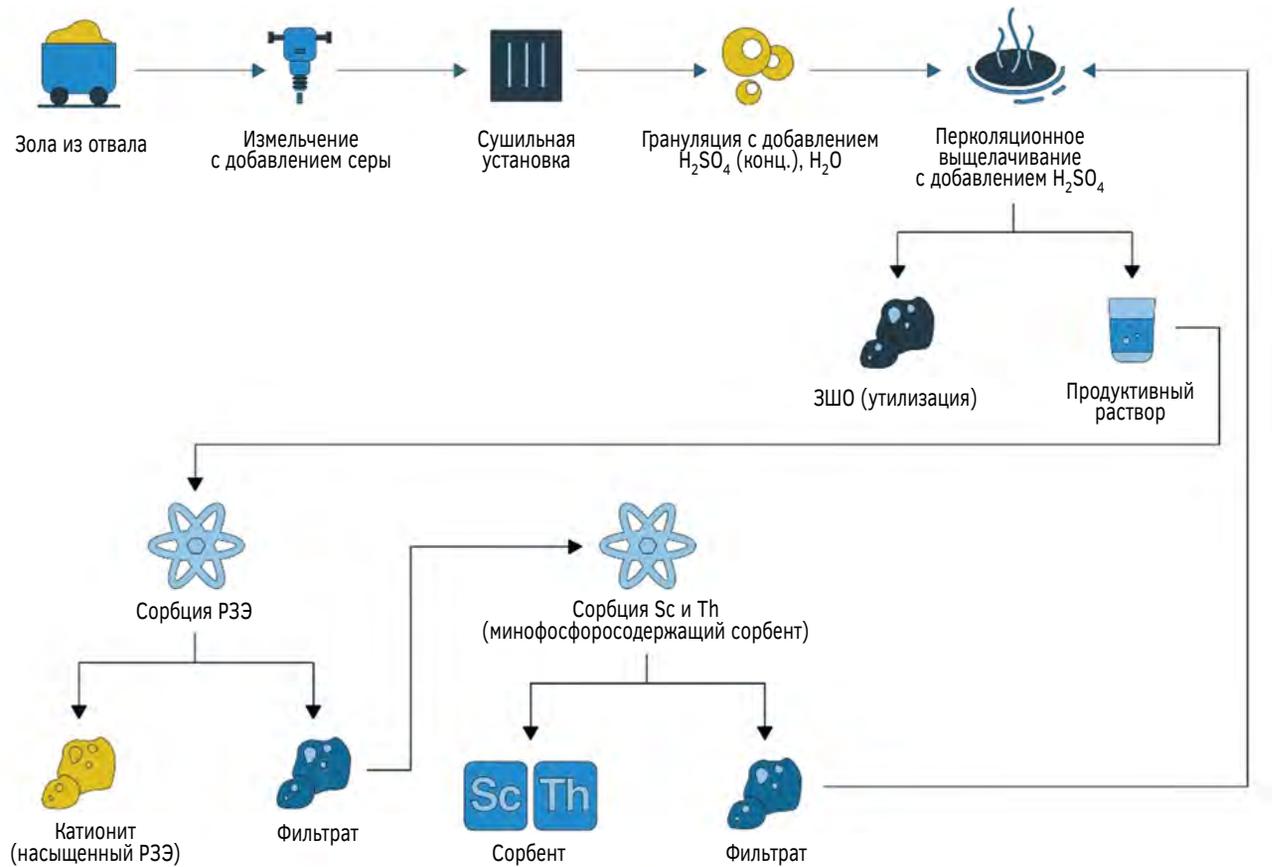


Рис. 15.16. Технологическая схема переработки ЗШО с извлечением редкоземельных металлов и скандия⁵ (непрерывный бесфильтрационный процесс)

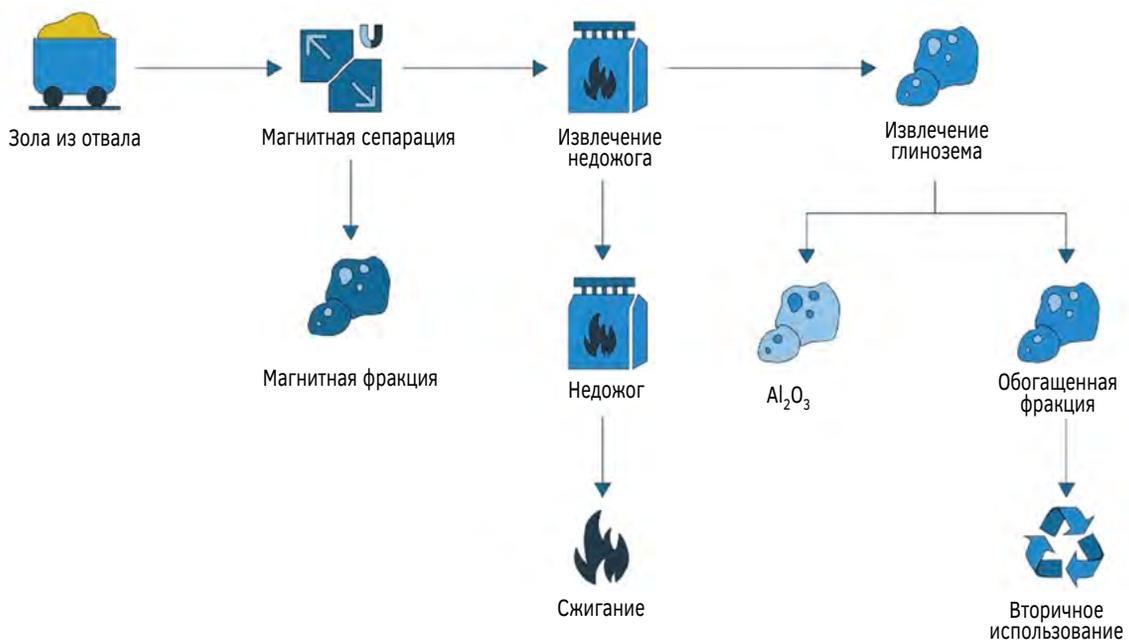


Рис. 15.17. Рекомендуемая упрощенная блок-схема обогащения ЗШО (подготовка к переработке и утилизации)

⁵ ЗШО после извлечения РЗЭ и скандия рекомендуется использовать в дорожном строительстве в качестве самостоятельного медленноотвердеющего вяжущего или гидравлической добавки к цементу.

Возможно использование ЗШО для очистки слабозагрязненных сточных вод (зола уноса обладает адсорбционными свойствами). Качество очистки оценивается по изменению состава сточных вод — с точки зрения снижения содержания тех или иных загрязняющих веществ.

Возможно также использование ЗШО в производстве гранулированного удобрения (повышает плодородие кислых почв). При этом известкование почвы с помощью мелиоранта, полученного из отходов, можно рассматривать как природоохранную и ресурсосберегающую технологию, поскольку при ее применении снижается расход азотных и фосфорных удобрений.

ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ В ОТРАСЛИ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Развитие технологий переработки ЗШО может пойти по двум основным сценариям:

- упор на простые технологии переработки (стройматериалы, удобрения);
- упор на комплексные технологии переработки с выделением ценных компонентов.

Эти сценарии не являются взаимоисключающими, более того, они дополняют друг друга — в некоторых технологиях после выделения ценных компонентов из ЗШО остаток можно направить на технологически простую переработку в стройматериалы. Уже сейчас существуют комплексные безотходные технологии переработки ЗШО, однако пока не наблюдается их реализация.

Развитие технологий переработки ЗШО угольной энергетики может дать толчок развитию переработки ЗШО, получаемых от сжигания других материалов. В первую очередь, учитывая тенденции развития сектора переработки твердых коммунальных отходов, речь идет о ЗШО мусоросжигательных заводов (МСЖ). В процессе сжигания мусора вредные вещества или уносятся с дымовыми газами, или концентрируются в несгоревшем остатке. Зола МСЖ во многих случаях намного опаснее золы угольных электростанций и требует еще более сложных и надежных технологий переработки. Учитывая трудности, с которыми сталкивается отрасль переработки ЗШО в вопросе развития комплексных технологий, можно с уверенностью сказать, что в разработке комплексных технологий переработки ЗШО МСЖ возникнет еще больше проблем. Тем не менее накопленный опыт позволит как минимум попытаться адаптировать существующие технологии для других видов ЗШО.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Делицын, Л. М. Возможные технологии утилизации золы / Л. М. Делицын, Ю. В. Рябов, А. С. Власов // Энергосбережение. — 2014. — № 2. — С. 60–65.
2. Федорова, Н. В. Оценка экономической эффективности получения алюминия путем электролиза расплава угольного шлака [электронный ресурс] / Н. В. Федорова, Ю. Н. Рогатина // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. — 2005. — № 4. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-ekonomicheskoy-effektivnosti-polucheniya-alyuminiya-putem-elektroliz-rasplava-ugolnogo-shlaka> (дата обращения: 01.07.2019).
3. Цельковский, Ю. К. Экологические и экономические аспекты утилизации золошлаков ТЭС / Ю. К. Цельковский // Энергия: экономика, техника, экология. — 2006. — № 4. — С. 27–34.
4. Эмдин, С. В. Система полной утилизации золошлаковых материалов / С. В. Эмдин, В. В. Жабо, Ю. К. Цельковский // Экология производства (Энергетика). — 2006. — № 1 (2). — С. 13–15.
5. Bourne, Jr. Coal's other dark side: Toxic ash that can poison water and people / Jr. Bourne, K. Joel // National Geographic [web site]. — URL: <https://www.nationalgeographic.com/environment/2019/02/coal-other-dark-side-toxic-ash/> (accessed: 14.10.19).
6. Chen, X. Preparation and characterization of foam ceramics from red mud and fly ash using sodium silicate as foaming agent / X. Chen, A. Lu, G. Qu // Ceramics International. — 2013. — Vol. 39, No. 2. — P. 1923–1929.
7. Davis, Raymond E. Properties of cements and concretes containing fly ash / R. E. Davis, R. W. Carlson, J. W. Kelly, H. E. Davis // ACI Journal, Proceedings. — 1937. — Vol. 33 (5). — P. 577–612.

8. Dubai buildings must use green concrete [electronic resource] // Kitco News. — URL: <https://www.kitco.com/news/2015-03-29/Dubai-buildings-must-use-green-concrete.html> (accessed: 31.05.2019).
9. History // EcoSmart Concrete [website]. — URL: http://ecosmartconcrete.com/?page_id=250 (accessed: 31.05.2019).
10. Key World Energy Statistics 2017 (PDF) [electronic resource]. — URL: [http://www.iea.org/publications/freepublications/30.IEA\(2017\)](http://www.iea.org/publications/freepublications/30.IEA(2017)).
11. Kingdom Tower report by Gaurav Jadhav [electronic resource] // Academia.edu. — URL: https://www.academia.edu/24071922/Kingdom_Tower_report (accessed: 31.05.2019).
12. *Kohubu, M.* Fly ash and fly ash cement. Proceedings / M. Kohubu // Fifth international symposium on the chemistry of cement. — Tokyo : Cement Association of Japan, 1969. — Part IV. — P. 75–105.
13. *Kumar, A.* Development of paving blocks from synergistic use of red mud and fly ash using geopolymerization / A. Kumar, S. Kumar // Construction and building Materials. — 2013. — Vol. 38. — P. 865–871.
14. *Zhang, M.* Synthesis factors affecting mechanical properties, microstructure, and chemical composition of red mud-fly ash based geopolymers / M. Zhang, T. El-Korchy, G. Zhang, J. Liang, M. Tao // Fuel. — 2014. — Vol. 134. — P. 315–325.

ВТОРИЧНЫЕ РЕСУРСЫ, ОБРАЗУЮЩИЕСЯ В ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Иван Васильевич Петров

Финансовый университет при Правительстве РФ,
декан факультета, профессор, доктор экономических наук

ВВЕДЕНИЕ

Вторичные минеральные ресурсы в горнодобывающей отрасли — это горные породы и отходы обогащения, которые можно применять в производстве в качестве исходного сырья, или как конечный материал — в качестве дополнительных материальных ресурсов. Использование вторичных ресурсов, как правило, экономически предпочтительнее добычи, обогащения и подготовки первичных ресурсов недр. Основными источниками вторичных ресурсов в горнодобывающей отрасли служат техногенные отходы, образующиеся при добыче и обогащении (переработке) минерально-сырьевых ресурсов и сконцентрированные в техногенных образованиях (породные, шлаковые и зольные отвалы, хвостохранилища и т. п.). Данные техногенные образования отличаются количеством и качеством содержащегося в них минерального сырья, пригодного для промышленного использования в настоящее время или в будущем — по мере развития технологий переработки и формирования соответствующего спроса.

По морфологическим признакам вторичные минеральные ресурсы в горнодобывающей отрасли разделяются на два типа:

- 1) насыпные техногенные ресурсы, представляющие собой отвалы и терриконики; к ним относятся:
 - терриконы угольных шахт и отвалы угольных разрезов,
 - отвалы рудников и карьеров руд цветных, черных и редких металлов, сложенные дезинтегрированными вскрышными и вмещающими породами и забалансовыми рудами,
 - техногенные россыпи, образующиеся при разработке россыпных месторождений и из отходов золоторудных обогатительных фабрик,
 - шлакоотвалы цветной и черной металлургии;
- 2) наливные техногенные ресурсы, образующиеся при заполнении впадин земной поверхности; к ним относятся:
 - отходы обогащения руд (шламо- и хвостохранилища горно-обогатительных фабрик);
 - шламоотвалы цветной и черной металлургии,
 - золо- и шламоотвалы энергетического комплекса, возникающие при гидравлическом удалении золы и шлаков с теплоэлектростанций,
 - шламоотвалы химического производства.

Исходя из состава, технологических особенностей и отраслевой принадлежности, вторичные минеральные ресурсы в горнодобывающей отрасли разделяют на:

- 1) породные техногенные ресурсы, состоящие из природных горных пород и глыбово-щебенистых материалов;
- 2) шламо- и хвостохранилища обогатительных фабрик;

- 3) техногенные ресурсы пирометаллургических процессов цветной и черной металлургии, сложенные шлами и шлаками;
- 4) техногенные ресурсы теплоэлектростанций, сложенные золой и шлаками тепловых электростанций ТЭС;
- 5) техногенные ресурсы химического производства.

Исходя из сфер возможного использования, вторичные минеральные ресурсы в горнодобывающей отрасли классифицируют на следующие виды:

- 1) техногенные ресурсы строительного сырья;
- 2) углеродсодержащие техногенные ресурсы, применимые в энергетике;
- 3) техногенные ресурсы по видам извлекаемого металла (медные, никелевые, золото, серебро, редкоземельные и т. п.);
- 4) техногенные ресурсы смешанного типа, т. е. пригодные для получения строительного сырья и металлов.

Функционирование горнодобывающей отрасли без надлежащего внимания к вопросам образования отходов привело к формированию обширных, часто смыкающихся друг с другом зон техногенного воздействия, экологически опасного для живущего в этих регионах населения и в целом для окружающей среды. В связи с этим крайне остро обозначилась в последние годы задача локализации и нейтрализации техногенных и природно-техногенных объектов, особо насыщенных вредными веществами.

ОБРАЗОВАНИЕ ОТХОДОВ В ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Отходы горного производства (*англ.* mining wastes; *нем.* Bergbau-Abgänge; *фр.* déchets miniers; *исп.* residuos (desechos, escombros) de la industria minera) — неиспользуемые продукты добычи и переработки минерального сырья, выделяемые из массы добытого полезного ископаемого (горные массы) в процессах разработки месторождения, обогащения и химико-металлургической переработки.

Отходы горнодобывающей промышленности — это пустые породы, извлекаемые при добыче вместе с полезным ископаемым, а также хвосты, образуемые при переработке полезных ископаемых.

Более развернутое определение дано в книге «Горное дело: терминологический словарь» (М., 2016). Отходы горного производства — непригодные к использованию продукты добычи и переработки минерального сырья, выделяемые из массы добытого полезного ископаемого в процессах разработки месторождения полезных ископаемых, обогащения и химико-металлургической переработки.

В настоящее время из извлекаемого природного сырья лишь 1–2% превращаются в готовую продукцию. Остальная же часть идет в отходы и складывается в специальных хранилищах. За 1988–2018 гг. потери при добыче полезных ископаемых составили:

- угля — 1890 млн т;
- железной руды — 24 млн т;
- апатитонелефиновой руды — 74 млн т;
- фосфоритовой руды — 33 млн т и т. д.

Классификацию отходов горного производства производят по фазовому составу и производственным циклам (табл. 16.1). Относительный выход отходов зависит от производственного цикла, характера сырья, содержания извлекаемых компонентов в исходном продукте.

Отходы всегда сопровождали горнодобывающее и горно-перерабатывающее производство, однако почти до середины XX в. они не рассматривались как особая проблема. С ростом добычи количество отходов стало быстро расти, причем значительно быстрее, чем выход продукции, так как одновременно уменьшалось содержание полезных компонентов в рудах, увеличивалась зольность углей, усложнялись условия разработки и соответственно увеличивался выход отвальных и вскрышных пород.

Таблица 16.1. Виды отходов в горно-металлургическом цикле

Фазовая характеристика отходов	Добыча		Обогащение		Металлургический передел	
	открытая	подземная	гравитационное, магнитное, электрическое	флотационное	гидрометаллургия	пирометаллургия
Твердые	Вскрышные породы	Шахтная порода	Хвосты	Хвосты	Осадки	Шлаки
Жидкие (растворы и суспензии)	—	Шахтные воды	Промывочная вода, шламы	Шламы, жидкая фаза пульпы	Солевые растворы	Охлаждающая вода
Пылегазовые	Пыли	Метан при добыче угля; вентиляционный воздух	—	Отсосы	Пары	Газы, пыли

В целом ряде горнопромышленных регионов эта проблема является весьма острой.

В горнозаводской зоне Урала (Челябинская, Свердловская области) эксплуатация золото- и меднорудных месторождений началась более двух веков назад с применением токсичной ртути (г. Карабаш — пример района глобальной геоэкологической катастрофы по шкале МЧС).

Железорудные месторождения начали эксплуатировать с нарастающей интенсивностью более полувека назад с выбросом значительного количества силикозоопасной кварцевой пыли и радионуклидов, других элементов-токсикантов, образующихся в процессах горно-металлургического производства. В результате Курская магнитная аномалия (КМА) отнесена к районам геоэкологического бедствия по шкале МЧС.

Общее количество накопленных хвостов, например, только на ГОКах КМА превышает 320 000 тыс. т. Вместе с немагнитными фракциями (гематитом) в шламохранилища сбрасываются золото, уран и редкоземельные элементы. По данным ГП «Невскгеология», в хвостохранилища только Михайловского ГОКа ежегодно в течение 30 лет выносятся не менее 1,5 т золота и 2 т урана. В целом прогнозные ресурсы золота, накапливающегося в текущих отходах четырех ГОКов, составляют не менее 3 т/год при валовом содержании 0,5–0,6 г/т, а по данным исследований Тульского филиала ЦНИГРИ, выполненных еще в 1977–1979 гг. на Лебединском, Михайловском ГОКах и на обогатительной фабрике шахты им. Губкина, в укрупненных пробах, отобранных из устья пульпопроводов, содержание золота составляет в пределах 2–9 г/т.

Эти проблемы характерны также для деятельности угледобывающих предприятий, сопровождающейся образованием больших территорий отвалов и шламохранилищ, которые накопились в Подмосковном, Кузнецком, Ростовском и Дальневосточных угольных бассейнах. В процессе открытой добычи угля формируются значительные объемы отходов. Если отсортировать все виды отходов угольных разрезов по массе, то первые места с большим отрывом будут заняты вскрышными породами: на них приходится более 90% всей массы отходов. Из остальных видов отходов, формирующихся на угольных разрезах, можно выделить золошлаковую смесь.

В 2017 г. на территории Российской Федерации, по данным Росприроднадзора, образовалось 6220,6 млн т отходов. Удельный показатель общего объема образования отходов на единицу ВВП в 2017 г. составил 98,3 т на 1 млн руб. В территориальном разрезе наибольшее количество образованных отходов в 2017 г. отмечено в Сибирском федеральном округе (4417,6 млн т, или 71% от общего количества по стране). Столь значительные объемы образования отходов в Сибирском федеральном округе связаны с добычей полезных ископаемых

(угля) в Кемеровской области, основном угледобывающем регионе Российской Федерации, и образованием большого количества вскрышных пород, которые являются отходами V класса опасности и объем которых в 2017 г. составил около 70% от общего объема образования отходов в Сибирском федеральном округе.

В сфере видов экономической деятельности наибольший объем образования отходов производства и потребления в 2017 г. приходился на вид экономической деятельности «добыча полезных ископаемых» — 5786,2 млн т, или 93% от общего количества образованных отходов. Это связано с тем, что при добыче и обогащении полезных ископаемых образуется наибольшее количество отходов, основу которых составляют вскрышные породы.

За период 2010–2017 гг. доля отходов от добычи полезных ископаемых увеличилась с 89,2% (3334,6 млн т) в 2010 г. до 93% (5786,2 млн т) в 2017 г. По данным государственного доклада о состоянии окружающей среды, в России ежегодное образование отходов производства и потребления по виду экономической деятельности «добыча полезных ископаемых» с 2010 по 2017 г. выросло в 1,74 раза (табл. 16.2).

Таблица 16.2. Образование отходов производства и потребления по виду экономической деятельности «добыча полезных ископаемых» в 2010–2017 гг.

Год	Ежегодный объем отходов, млн т
2010	3334,6
2011	3818,7
2012	4629,3
2013	4701,2
2014	4807,3
2015	4653,0
2016	4723,8
2017	5786,2

По данным государственной статистики, общая величина накопленных отходов горно-производства составляла на конец 2016 г. около 40,7 млрд т, а на конец 2017 г. — 38,1 млрд т. Наибольшая часть (99%) накопленных отходов относится к V классу опасности, то есть к практически неопасным отходам, которые характерны для горнодобывающих отраслей промышленности. В то же время, по экспертным оценкам, на территории России в отвалах и хранилищах накоплено свыше 100 млрд т горнопромышленных отходов, количество которых ежегодно увеличивается более чем на 5 млрд т. Горнодобывающая промышленность России является главным источником образования промышленных твердых отходов в стране. Считается, что в этой отрасли образуется и накапливается 85–90% всех промышленных твердых отходов страны.

Анализ официальной статистической информации позволил сделать вывод о том, что, несмотря на увеличение объемов использования и обезвреживания отходов, отмечается устойчивый рост объемов образования и накопления отходов. Горная промышленность занимает ведущее место по выходу твердых отходов в нашей стране и за рубежом. Причем отходообразование с каждым годом увеличивается. Отчасти это обусловлено ухудшением горно-геологических условий добычи и качества сырья. Сохранение негативных тенденций к росту образования и накопления отходов добычи полезных ископаемых можно рассматривать как проявление ряда проблем в минерально-сырьевом комплексе, анализ которых позволил объединить их в три группы:

- связанные с условиями добычи полезных ископаемых;
- обусловленные несовершенством управления недропользованием в минерально-сырьевом комплексе;
- проблемы институционального характера.

В ежегодных Государственных докладах отмечается снижение качества запасов, стоящих на балансе, и ухудшение параметров вновь открываемых месторождений. В результате снижения содержания полезных компонентов для получения того же объема продукции требуется извлечение большего объема горной массы.

За последние годы содержание железа в рудах снизилось с 56–58% до 30–33%, произошел переход на добычу железистых кварцитов. В конце XIX в. большая часть добываемых медных руд содержала 5–8% меди, в 1925 г. — 0,7–3%, в конце 1970-х гг. — 0,4–1,5%.

Ухудшение горно-геологических условий работ. Многолетняя практика разработки наиболее доступных и высококоррентабельных запасов полезных ископаемых привела к истощению минеральных ресурсов, ухудшению их качества, необходимости вовлечения в отработку месторождений с более сложными горно-геологическими условиями. Последнее усугубляется понижением глубины отработки месторождений, вследствие чего увеличиваются объемы извлекаемых пустых пород и низкокондиционных минеральных ресурсов, которые размещаются в виде отвалов.

Технологические условия ведения горных работ характеризуются:

- неэффективным использованием запасов, с нередко практикующейся выборочной отработкой богатых запасов, что ведет к ухудшению их структуры. Например, в запасах уникального Октябрьского месторождения (Норильский горнопромышленный район) среднее содержание меди составляет 1,7%, никеля — 0,84%, платиноидов — 4,7 г/т, а в добываемых рудах они существенно выше: меди — 4,8%, никеля — 1,9%, платиноидов — 11,8 г/т). Отвальные хвосты при производстве товарных железных руд, медных, цинковых и пиритных концентратов содержат значительное количество меди, цинка, серы, редких элементов;
- высоким уровнем потерь полезных ископаемых на стадиях добычи и переделов. Например, при осуществлении всех новых калийных проектов планируется использовать только традиционный (шахтный) способ добычи, при котором в недрах теряется в среднем до 60% руды. При переработке хибинских апатит-нефелиновых руд в отвалах фосфогипса ежегодно теряется такое количество редкоземельных элементов (РЗЭ), которого хватило бы для удовлетворения всех мировых потребностей;
- применением технологий и систем отработки месторождений, ведущих к увеличению объемов отходов.

Железосодержащие техногенные отходы производства железорудной промышленности на различных горно-обогажительных комбинатах составляют значительные объемы:

- АО «Олкон» — 380 млн т техногенных отходов;
- ОАО «Ковдорский ГОК» — 104,2 млн т отходов в спецотвалах охранного складирования;
- ОАО «Тейское рудоуправление» — 21,2 млн т.

Отходы горно-обогажительного производства негативно воздействуют на окружающую среду и обуславливают существенные затраты, связанные с содержанием хвостохранилищ, требуют изъятия из хозяйственного оборота значительных земельных площадей, необходимых для ведения горных работ, на удаление и хранение отходов затрачивается в среднем от 5 до 8% стоимости производимой продукции.

Основными отходами процесса обогащения железных руд являются «хвосты», образующиеся в технологических операциях измельчения, классификации, обогащения, сгущения, фильтрования. Кроме пустой породы в хвостах могут присутствовать частицы железосодержащих минералов в количестве от 8 до 26,5%. Объемы хвостов составляют от 40 до 83% от объема обогащаемого материала — в зависимости от уровня содержания железа в перерабатываемых рудах.

Удельные объемы образования отходов производства по видам, источникам образования и методам обращения представлены в табл. 16.3.

Таблица 16.3. Удельные объемы образования отходов производства

Отходы	Ед. изм.	Источник образования	Метод обращения	Масса отходов на 1 т продукции	
				диапазон	среднее
Отходы добычи и обогащения железных руд	т/т	Процессы обогащения	Укладка в хвостохранилище	1,35–4,5	2,6
Сорбенты, фильтры, фильтровальные материалы, утратившие потребительские свойства	кг/т	Фильтрование, сгущение	Размещение на полигонах	10–70	47

По сути, хвостохранилища представляют собой техногенные месторождения полезных ископаемых, освоение которых возможно с появлением новых прогрессивных технологий извлечения полезных компонентов.

Хвостохранилища занимают огромные площади. Подсыхающие надводные пляжи создают пыление при ветреной погоде. Горнорудные предприятия разрабатывают ряд мер, снижающих пылящее воздействие таких пляжей путем высадки облепиховых и ивовых кустарников. Укладывают хвосты в тело дамб, формируют защитные пляжи дамб, укладывают хвостовую пульпу рассредоточенным способом по периметру хвостохранилища — для максимального смачивания пылящих пляжей, выполняют профилактическую обработку пляжей хвостохранилища специальным раствором.

Помимо хвостов, к отходам производства обогатительных фабрик следует отнести: сорбенты; фильтры; фильтровальные материалы, утратившие потребительские свойства; отходы обслуживания и ремонта оборудования, которое не подлежит утилизации, сдаче в металлолом.

В то же время отходы горно-обогатительного и горно-металлургического производства являются фактором негативного воздействия на окружающую среду. Накопленные в отвалах и хвостохранилищах массы отходов при средней толщине слоя 20 м занимают площадь более 1300 км². Ежегодное увеличение площади отчуждаемых земель составляет не менее 85–90 км². Негативное воздействие на окружающую среду проявляется на территории, в 10 раз и более превышающей площадь, занимаемую отходами.

Особенно остро экологические проблемы горнопромышленных отходов проявляются в северо-восточных и арктических регионах, где сосредоточены основные запасы минерально-сырьевых ресурсов. Особенность их социально-экономического развития — ведение хозяйственной деятельности, ориентированной на сырьевой сектор в экстремальных природных условиях.

Говоря об отходах горного производства, следует обратить внимание, что в европейском законодательстве действуют очень либеральные условия: пустые породы относятся к инертным отходам (inert waste) — отходам производства, которые не подвергались существенной переработке и размещение которых не приведет к загрязнению окружающей среды и нанесению ущерба здоровью человека. Согласно директиве 2006/21/ЕС, при обращении с инертными отходами к ним предъявляются смягченные требования.

ТЕХНОГЕННЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ НАКОПЛЕННЫХ ОТХОДОВ В ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Типичные этапы технологических процессов в горнодобывающей промышленности включают в себя добычу полезного ископаемого, его обработку с получением полезной продукции, отгрузку, организованное складирование отходов добычи и переработки сырья. При добыче вместе с полезным ископаемым извлекаются пустые породы, а при обработке

образуются хвосты. Отходы (пустые породы и хвосты), складированные в отвалах и хвостохранилищах, в дальнейшем могут быть вторично переработаны или использованы в различных целях. Территории, на которых расположены отвалы и хвостохранилища, должны рекультивироваться для снижения негативного воздействия отходов на окружающую среду.

В соответствии с основными положениями по восстановлению земель, предприятия, разрабатывающие месторождения полезных ископаемых открытым способом, а также проводящие другие работы, вызывающие нарушение почвенного покрова (механическое повреждение, загрязнение, затопление), обязаны снимать и транспортировать к месту укладки (или временного хранения) плодородный слой почвы и наносить его на восстанавливаемые земли или малопродуктивные угодья. Горнотехническая рекультивация земель, нарушенных горными работами, начинается со снятия плодородного слоя почвы на всех площадях, отведенных под производственные объекты предприятия. Снятие плодородного слоя почвы с использованием бульдозеров различных моделей наиболее распространено. Плодородный слой снимают последовательными заходками и создают временный почвенный штабель. Погрузку почвы производят экскаваторами или погрузчиками в транспортные средства.

Складывают плодородный слой почвы во временные отвалы или бурты. В буртах плодородный слой почвы может храниться в течение 20 лет. Под бурты обычно отводят участки, непригодные для ведения сельского хозяйства, или малопродуктивные угодья, на которых исключается подтопление, засоление или загрязнение промышленными отходами. Снятие и складирование плодородного слоя почвы проводят в соответствии с требованием ГОСТ 17.5.3.06–85 и ГОСТ 17.4.3.02–85.

Вскрышные породы с низким содержанием воды обычно размещают в отвалах. Влажные породы перед размещением в отвалах могут подвергаться предварительному обезвоживанию. Отвалы в процессе эксплуатации требуют принятия мер по защите от ветровой эрозии.

Отвалообразование — это технологический процесс размещения вскрышных пород, удаляемых при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом. Удаляемые пустые породы размещают на отвалах — специально отведенных ИТС 37–2017.

Отвалообразование и складирование — заключительные технологические процессы в разработке горных пород на карьерах. Насыпь пустых пород называется породным отвалом, насыпи пород плодородного слоя, некондиционных руд и полезного ископаемого — складами или спецотвалами. Породные отвалы различают по месторасположению относительно контура карьера, числу ярусов отсыпки и средствам механизации отвальных работ.

Одним из потенциальных видов источников минерального сырья являются твердые горнопромышленные отходы, накопленные на территории нашей страны в достаточном объеме. Часто они содержат, помимо основных, различные попутные полезные, а иногда и дефицитные для отраслей промышленности компоненты. Причем большая часть компонентов добывается в других местах на специально предназначенных для этого предприятиях. В настоящее время техногенные образования накопленных отходов горнодобывающей отрасли следует рассматривать как техногенные месторождения.

Говоря о техногенных месторождениях, следует обратиться к их определению в академическом словаре «Горное дело: терминологический словарь»: «Техногенное месторождение — скопление техногенных минеральных ресурсов, образовавшихся в результате складирования отходов горного производства, пригодное для разработки и производства товарной продукции или оказания услуг».

По принципу формирования техногенные месторождения разделяют на две основные категории:

- созданные без учета дальнейшего освоения, сформированные на основе традиционных требований к складированию отходов производства без учета возможности или целесообразности разработки в настоящее время или в будущем, но с обязательным соблюдением требований минимального негативного воздействия на окружающую среду;

- формируемые с заданными технологическими, геомеханическими и физико-химическими параметрами по специальным технологиям в целях дальнейшего вовлечения в промышленный оборот и соблюдения требований минимизации негативного воздействия на окружающую среду.

В соответствии с действующим законодательством, хранение отходов производства и потребления осуществляется в специализированных объектах в течение более одиннадцати месяцев в целях утилизации, обезвреживания, захоронения. По данным Государственного доклада «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 году», в сфере видов экономической деятельности наибольшее количество отходов находилось на хранении на объектах, принадлежащих предприятиям по добыче полезных ископаемых — 2254 млн т. Это более 74% от годового объема. Также горнодобывающие отрасли характеризуются наибольшим показателем захоронения отходов — 773,4 млн т (более 13%).

Техногенные месторождения бывают двух основных видов:

- хранилища отходов добычи;
- хранилища отходов переработки полезных ископаемых.

В данном случае под отходами подразумевается та часть минеральной массы, которая не может быть использована в момент ее поступления.

Эти два вида отходохранилищ отличаются тем, что слагающая их горная масса имеет различный минералогический и гранулометрический состав. Исходя из этого, способы их создания различаются.

Отходы добычи представляют собой, как правило, вскрышные породы, средняя крупность частиц которых составляет десятки сантиметров. Содержание полезных компонентов в них низкое, поэтому, с точки зрения использования, они представляют интерес преимущественно как сырье для производства строительных материалов. Хранятся они в открытых насыпях различной формы (пирамидальная, коническая и т. д.).

Отходы переработки полезных ископаемых имеют среднюю крупность частиц от долей миллиметра до нескольких миллиметров. Поскольку они образуются в результате передела специально добываемой минеральной массы, они могут включать в себя побочные полезные компоненты в достаточном для промышленного использования количестве.

Так называемые хвосты могут быть «мокрыми» (содержат большое количество воды) и «сухими». Сухие хвосты складировать аналогично отходам добычи. Для мокрых же, в целях снижения занимаемых ими площадей, создают оградительные дамбы, предотвращающие их растекание по поверхности земли. Располагают их обычно в долинах рек или ручьев. Со временем вода из хвостохранилищ уходит.

Отходы обогащения руд характеризуются измененными физико-механическими и физико-химическими свойствами минералов, представлены агрессивной пульпой, насыщенной флотационными реагентами и имеющей рН среды 10–11, с процентным содержанием твердого в среднем 20%.

Отходы переработки также размещают как на поверхности, так и в недрах земли.

Складирование текущих отходов переработки наиболее труднообогатимых медно-колчеданных руд, имеющих 4-й класс опасности, осуществляют без предварительной подготовки в специально построенные поверхностные емкости — хвостохранилища. Классическим является складирование в хвостохранилища намывного типа путем перекачивания хвостовой пульпы по трубопроводам на специально подготовленную площадку, огражденную дамбой, — хвостохранилище. Способ отличается наименьшей стоимостью складирования, но требует строительства дамбы, способной выдержать напор отходов.

Гидравлический способ размещения текущих хвостов переработки руд без предварительной подготовки в емкости хвостохранилища, расположенного в непосредственной расчетной близости от обогатительной фабрики (ОФ) и карьера, наиболее распространен в отечественной и мировой практике работы обогатительных производств. Это объясняется тем, что данная технология:

- 1) проста в исполнении и менее затратна в плане механизации;
- 2) достаточно отработана: так, например, происходит складирование отходов на Учалинском, Сибайском, Бурибаевском ГОКах, а также на обогатительных фабриках Канады, США, Японии, Австрии и др.;
- 3) позволяет обеспечить отстой технологических вод и их возврат в оборотную сеть водоснабжения обогатительной фабрики (ОФ).

Основным недостатком такого способа размещения отходов является повышенная экологическая опасность эксплуатации поверхностных хвостохранилищ, так как при их формировании и функционировании происходит загрязнение воздуха, подземных и поверхностных вод, почвенного покрова на обширных территориях. На долю пылящих поверхностей сухих намывных пляжей, откосов дамб и плотин приходится 54% от общего количества выбросов горного предприятия. Приконтурные пляжи мелкодисперсного песка являются мощным источником пыли, которая в жаркое и сухое время года переносится воздушными потоками при скорости более 2 м/с на окружающие территории, оседая в городах, полях и на сельскохозяйственных угодьях. Пылевые потоки загрязняют плодородную почву металлами и ухудшают экологическое состояние воздушного бассейна в горнодобывающем регионе. Поэтому проблема предотвращения пыления хвостохранилищ требует эффективных технических решений.

Частичным решением проблемы пыления является использование технологии наливных хвостохранилищ, когда вся площадь хвостохранилища покрыта водой. Однако реализация такой технологии требует значительного водного ресурса, что само по себе наносит экологический ущерб подземной водной среде и к тому же требует весомых материальных средств на реализацию.

Из оценки негативных факторов размещения обводненных хвостов на поверхности следует, что организация хвостового хозяйства на горнодобывающих предприятиях связана со значительными затратами на постоянное наращивание дамб хвостохранилищ. Кроме того, поверхностное складирование огромных объемов агрессивного техногенного сырья, содержащего тяжелые металлы, влечет уничтожение естественной природной среды региона, как на отчужденной под хвостохранилище территории, так и на прилегающем почвенном покрове и в водных системах. Весьма высоко негативное влияние таких образований на экологическую обстановку урбанизированных районов и здоровье населения. Значительна вероятность возникновения нестабильной гидротехнической ситуации в регионе добычи и угрозы прорыва дамб. Оценить весь масштаб воздействия весьма сложно. Существующие методики нормирования допустимых концентраций загрязняющих веществ в сбросах и выбросах хвостохранилищ не учитывают всех совокупных факторов, влияющих на условия жизнедеятельности в регионах добычи и переработки минерального сырья.

Экологическая ситуация, обусловленная добычей минерального сырья и размещением отходов более чем на 25% территории Уральского экономического района, оценивается как кризисная. Несколько меньше площади таких земель в Южном Приморье, Ханты-Мансийском АО, Тюменской области, Красноярском крае и других районах интенсивной добычи и переработки полезных ископаемых. В значительной мере с отходами связана оценка состояния водных ресурсов как «грязное» и «очень грязное» таких рек, как Лена, Амур, Обь, Алдан, в бассейнах которых нарушенные и загрязненные территории занимают более 10%.

Загрязнение атмосферы техногенными месторождениями происходит в результате выветривания различных веществ из складированной горной массы. Выделяемые компоненты — это чаще всего пыль и газы (особенно при горении отвалов угольной промышленности). Наибольшее выделение вредных веществ происходит в процессе непосредственного складирования. При хранении отходов оно постепенно снижается и доходит до уровня естественного выветривания. Выделяемые из отвалов и хвостохранилищ ингредиенты нередко являются едкими или радиоактивными.

Причиной изменения ветрового режима является сопротивление, создаваемое хранилищами движению воздушных масс. Обычно, вследствие ограниченности земельного отвода, отвалы и хвостохранилища располагают вокруг горных предприятий и вблизи населенных пунктов. Высота этих сооружений достигает 100 и более метров, а длина — до нескольких километров. Поэтому, задерживая ветровые потоки, они обуславливают ухудшение проветривания территорий предприятия и населенного пункта, что способствует увеличению концентраций вредных веществ в атмосфере этих объектов. Изменение ветрового режима является также причиной изменения других климатических показателей: влажности, температуры и т. д.

Загрязнение водных объектов твердыми отходами происходит вследствие вымывания ряда веществ при фильтрации природных водных потоков через массы минеральных веществ. Степень загрязнения определяется количеством атмосферных осадков, выпадающих в течение года, и притоком наземных вод, преграждаемых этими объектами и фильтрующихся через них. Основные загрязняющие вещества — это различные минеральные соли и взвешенные вещества.

Изменение гидрогеологического режима территорий, на которых находятся отвалы и хвостохранилища, обусловлено давлением горных пород на грунт, что приводит к изменению направлений подземных потоков. Хранилища минеральных отходов располагают чаще всего в руслах рек и ручьев. При этом течения в наземных водных объектах также меняют свои характеристики. Некоторые предприятия для снижения этого негативного эффекта вынуждены создавать искусственные русла подверженным влиянию водоемам, что также полностью не ограждает от последствий.

При непосредственном контакте горных отходов с земной поверхностью между ними происходит массообмен, и загрязняющие вещества из хранилищ попадают в почву и недра. Плодородность почв, непосредственно примыкающих к ним, снижается.

Нарушение плодородного слоя происходит вследствие его захоронения под отходами в случае отказа от предварительного снятия почвы. После окончания горных работ занятая площадь в большинстве случаев не освобождается, поэтому находящийся под отвалами плодородный слой оказывается потерянным для народного хозяйства. Кроме того, при длительном хранении плодородный слой теряет свои свойства.

Минеральные отходы хранятся, чаще всего, в больших объемах, поэтому давление, оказываемое ими на земную поверхность, передается в недра и приводит к изменению напряжений в массиве. Это может ухудшить условия ведения работ на горном предприятии.

Хранилища твердых отходов организуются обычно на сроки, исчисляемые десятками лет. Все это время на занимаемых ими земельных площадях практически отсутствует жизнь. Поэтому изъятие земельных площадей из природного баланса наносит ущерб окружающей среде. Особенно он становится заметным, если ранее эти площади использовались в сельском хозяйстве. В таком случае ущерб выражается в недополучении прибыли от использования этих ресурсов.

Вторичные загрязнения окружающей среды техногенными месторождениями обуславливаются круговоротом веществ и энергии между тремя сферами биосферы: атмосферой, гидросферой и литосферой.

В качестве примеров вторичных загрязнений можно привести: изменение химического состава водной среды и почв при выпадении осадков из загрязненной атмосферы, загрязнение почв при стоке вод с отвалов и т. д.

Многие из перечисленных факторов на современном этапе с трудом поддаются учету, поэтому при определении ущерба, вызванного размещением горнопромышленных отходов в окружающей среде, принято включать в оценку лишь те факторы, для которых возможен расчет их абсолютной величины. Невозможность расчета в данном случае связана с недостатком исходных данных.

Дальнейшее изучение техногенных месторождений привело к обоснованию рациональных способов складирования минеральных отходов, которое влияет на технологию отработки и соответствующие затраты, а также способствует снижению потерь при их использовании. Эти вопросы изложены в трудах академика К. Н. Трубецкого, где определяются оптимальные параметры техногенных месторождений.

Последние представляют собой их качественные и количественные характеристики (форма и размеры, местоположение в пространстве, внутреннее строение, качество складированного полезного ископаемого, число складов и т. д.), благодаря которым техногенные месторождения будут отвечать ряду требований. Под требованиями в данном случае подразумеваются:

- обеспечение точности процессов технологии;
- возможность применения в системе «добывающее предприятие — техногенное месторождение — перерабатывающее предприятие»;
- сохранение качества всех видов полезных ископаемых;
- несмешиваемость различных видов полезных ископаемых и их совместимость;
- охрана окружающей среды и минимум нарушенных земель;
- возможность последующего восстановления земель;
- «малоотходность».

ПОТЕНЦИАЛ ОТХОДОВ В ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КАЧЕСТВЕ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ

Регулирование использования отходов горнодобывающей отрасли в качестве вторичных ресурсов и обоснование направлений такого использования осуществляется по ГОСТ Р 55100–2012 «Ресурсосбережение. Наилучшие доступные технологии обращения с отходами в горнодобывающей промышленности. Аспекты эффективного применения».

Являясь важным резервом получения дополнительных объемов минерального сырья, техногенные образования (месторождения), включающие все виды промышленных отходов, шламо- и шлакохранилища, места разового складирования отходов, в последнее время привлекают к себе все больше внимания не только из-за своей ресурсной ценности, но также из-за необходимости их ликвидации как мощных источников загрязнения окружающей среды в районе их расположения. Поэтому увеличение объемов их утилизации является актуальной проблемой.

Горные производства — сложные, технологически и организационно связанные процессы. Зачастую переработка складированных отходов невозможна без остановки связанного с ними производства и нарушения технологического цикла (например, при переработке обводненных хвостов обогащения) или строительства нового хвостохранилища, поэтому разработку таких отходов можно вести только тогда, когда их отвалы уже сформированы (закрываются).

Большой проблемой является сохранность качества сырья, содержащегося в горнопромышленных отходах. Одна из причин, сдерживающих переработку «лежалых» отходов, — ухудшение со временем их качественного и количественного состава, не позволяющее или ограничивающее возможности их промышленной переработки.

В хвостах обогатительных фабрик Урала содержится 0,3–0,4% цинка, 0,2–0,3% меди, 20–35% серы, более 35% железа. Количество образующихся хвостов в результате обогатительного производства ежегодно составляет 5–7 млн т. Суммарная ценность металлов, накопленных в горнопромышленных отходах России и извлекаемых технологически, по оценкам специалистов, в 4 раза превышает стоимость их известных запасов в недрах, которые пока не используются. По общим запасам хвостохранилища уральских предприятий

существенно превосходят многие месторождения. Кроме того, использование (в промышленных масштабах) отходов добычи и переработки полезных ископаемых обеспечит экологическую реабилитацию территорий, подверженных негативному воздействию объектов хозяйственной деятельности.

Извлечение золота, урана, редких металлов из старых отвалов ведется с начала 1960-х гг. Отвалы служат источником дополнительного производства меди, угля и т. д., например, из нефелиновых хвостов флотации апатита получают алюминий, галлий, поташ, соду, цемент. Прогнозируется использование 30–40% твердых отходов в качестве строительных материалов, 20–30% для закладки выработанного пространства в шахтах и карьерах. Бактериальное выщелачивание позволит доизвлекать из хвостов обогащения тяжелые цветные металлы. Возможно использование окисленных железистых кварцитов, накопленных в отвалах железорудных месторождений и хвостах магнитного обогащения. Разрабатываются комбинированные схемы обогащения шлаков, шламов, кеков и других отходов металлургии. Сорбционная и ионообменная технологии позволяют извлекать цветные металлы, соли, галлоиды из стоков, пульп, шахтных вод и т. п.

Переработка отходов горного производства, как правило, связана с потребностями смежных отраслей в сырье. Исследования по утилизации отходов показали возможность комплексной переработки многих из них с полным или частичным переходом на производство различных видов продукции из отходов (табл. 16.4).

Несмотря на такой огромный ресурсный потенциал, горнопромышленные отходы в России используются лишь как сырье для стройиндустрии (не более 10% годового объема их образования). При этом надо обратить внимание, что значительные объемы отходов обогащения колчеданных руд цветных металлов нецелесообразно вторично использовать в качестве строительных материалов, поскольку они содержат металлы и сернистые соединения, со временем ослабляющие прочность конструкций. Несмотря на рост объемов использования отходов производства и потребления при добыче полезных ископаемых, сохраняется тенденция к росту их накопления, с превышением темпов роста накопления над темпами роста использования отходов.

Вскрышные породы V класса опасности с низким содержанием воды можно направлять на закладку пространств, выработанных в процессе добычи угля, и на рекультивацию земельных участков. Закладку и рекультивацию можно проводить только после того, как на определенном участке разреза добычные работы были окончательно завершены. При этом, согласно приказу Минприроды России от 25.02.2010 № 50, горные породы, используемые для закладки выработанного пространства, засыпки провалов и рекультивации, в лимиты на размещение отходов не включаются (т. е. фактически не рассматриваются как отходы). Для производства строительных материалов (щебня, цемента, керамических стеновых материалов) пригодны 67% вскрышных пород железорудных месторождений.

Основные пути снижения накоплений минеральных отходов:

- закладка отработанного пространства;
- использование при создании различного рода насыпей;
- изготовление строительных материалов;
- извлечение полезных компонентов;
- рекультивация и т. д.

Однако наиболее рациональным способом ликвидации хранилищ твердых отходов является промышленное использование содержащейся в ней минеральной массы.

При вовлечении в переработку отходов горнорудного производства наряду с пополнением минерально-сырьевой базы (МСБ) решаются экологические проблемы. Особую привлекательность придает техногенным месторождениям то, что, как правило, они расположены в промышленно развитых районах, нередко в границах населенных пунктов и крупных городов, находятся на поверхности земли, а горная масса в них преимущественно дезинтегрирована, что резко снижает затраты на их разработку.

Таблица 16.4. Возможные направления использования отходов в смежных отраслях

Отрасли, производящие отходы	Продукция из отходов для отраслей							
	топливо	черные металлы, их соединения и сплавы	цветные металлы, их соединения и сплавы	удобрения и продукты основной химии	стройматериалы	сырье для атомной энергетики	другие виды использования	
Угольная промышленность	Уголь из отвалов; метан из шахт Газификация отвалов	Fe из пирита	Al, Al ₂ O ₃ , Al-Si сплавы	Известкователи почв; серная кислота из пирита	Аглопорит; щебень; кирпич	—	Закладка шахт; дорожное строительство	
Теплоэнергетика	Горячая масса из золы; тепло энергоустановок	Fe-Si сплавы из золы	Al-Si сплавы из золы; Ge; Ga; Mo	Серная кислота из отходящих газов; микроудобрения	Щебень; золотавый; аглопорит; кирпич	U; Th	Дорожное строительство	
Черная металлургия	Тепло металлургических печей	Fe из окисленных кварцитов	V; Co; Cu; Ni; Ti; Zr; Zn; Mg; Ba; Ta; Nb и др.	Фосфорные удобрения	Щебень; шлакобетон; цемент; огнеупоры; песок; известь	—	Дорожное строительство; засыпка оврагов; закладка шахт; ирригационное строительство	
Цветная металлургия	Автогенное сжигание сульфидов; тепло металлургических печей	Fe из пирита, пирротина, титаномагнетита	Металлы из старых отвалов, шлаков, хвостохранилищ, осадков, стоков	Серная кислота; микроудобрения	То же	U; Th; Li; Be	Закладка шахт	
Производство минеральных удобрений (горная химия)	—	Магнетит; титаномагнетит; перовскит	Редкие земли; Al из нефелина; Ti; Mg	Фосфор из хвостов обогащения; содопродукты из нефелина; удобрения из отходов обогащения	То же	U; Li из рассолов; Th	То же	
Производство нерудных стройматериалов	—	Магнетит и Fe при обогащении песков	Ti; редкие земли при переработке песков	Известкователи почв; улучшение структуры почв; адсорбенты влаги в почве	То же	—	Закладка шахт и карьеров; дорожное строительство; ирригационные сооружения	
Атомная энергетика	Тепло установок	Fe; Mn	Au; Cu; Zn; Pb	Микроудобрения; фосфорные удобрения; серная кислота	То же	Доизвлечение U; Th из отходов	Закладка шахт	

Расположенные вблизи урбанизированных территорий отходы обогащения приводят к серьезному ухудшению состояния окружающей среды, что отрицательно сказывается на социально-экономической и санитарно-эпидемиологической обстановке в регионе.

Текущая обеспеченность базовых отраслей экономики разведанными запасами основных видов полезных ископаемых представляется достаточно удовлетворительной. В то же время наметились или обострились проблемы МСБ цветных металлов.

Не обеспечен собственным сырьем ряд медеплавильных заводов Урала: Красноуральский, Среднеуральский, Карабашский, Медногорский. На Кольском полуострове с выбыванием Ждановского карьера, основного поставщика (около 80%) медно-никелевых руд в регионе, в сложном положении окажутся металлургические комбинаты «Печенганикель» и «Североникель». Без достаточной сырьевой базы на оперативных, практически ежегодно приращиваемых запасах работают свинцово-цинковые рудники в Читинской области, Приморье и на Северном Кавказе, оловянные — в Хабаровском и Приморском краях, вольфрамовые — в Приморском крае.

По мере исчерпания запасов разрабатываемых месторождений техногенные объекты могут стать приоритетным, а в некоторых случаях — и единственным источником минерального сырья.

Из наиболее крупных техногенных накоплений рудного минерального сырья можно выделить хвосты обогащения Гайского, Норильского, Салаирского, Учалинского и Солнечного ГОКов; шлаки металлургических заводов — Среднеуральского, «Электроцинк», «Печенганикель», «Североникель»; некондиционные руды Гайского, Сибайского и других ГОКов.

Набольшее количество отходов накоплено в регионах с развитой горнодобывающей и металлургической промышленностью (Урал, Приморский край, Мурманская, Белгородская, Кемеровская, Тульская области). Например, официальные потери при обогащении на предприятиях Кольской ГМК составляют до 30% в год, основные потери — труднообогатимые хвосты флотации и шлаки, переработка которых — весьма энергоемкое производство. В лежалых хвостах образуются кварц-сульфатные корки, что делает сквозное извлечение никеля из таких отходов очень низким. В процессе длительного хранения также изменяются физико-механические свойства пород. Так, исследования пород вскрыши из отвалов Оленегорского железорудного месторождения Мурманской области, используемых в качестве строительных материалов, показали ухудшение их прочностных характеристик.

Ежегодно накопление хвостов обогащения на промплощадках предприятий цветной металлургии составляет около 400 млн т. Только на территории Свердловской области на 188 техногенно-минеральных объектах складировано свыше $8,5 \cdot 10^9$ т отходов добычи и переработки различных полезных ископаемых, в том числе $1,7 \cdot 10^9$ т отходов обогащения руд, из которых только 10% вовлекается в последующее производство. Значительным потенциалом для извлечения редкоземельных металлов обладают отходы металлургического производства.

Примером ценности горнопромышленных отходов могут служить техногенные отходы медной подотрасли Урала — 220 млн т хвостов обогащения, в которых среднее содержание меди (0,34–0,37%) в отвалах некондиционных руд и хвостах обогащения близко к кондиционным (0,35–0,5%). Наибольшую ценность в хвостах обогащения уральских руд представляют сера (30–50% общей стоимости хвостов), драгоценные металлы (25–45%), медь (10–20%) и цинк (10–15%).

Накопленные отходы, представляя экологическую опасность, тем не менее несут в себе значительную ресурсную ценность: среднее содержание меди в хвостохранилищах составляет 0,37%, цинка — 0,39%, серы — 21,9%. Это зачастую выше бортового их содержания на многих вновь вовлекаемых в разработку месторождениях. В соответствии с программой переработки техногенных образований Свердловской области, утилизировано более 44 106 т различных отходов, в том числе $26,2 \cdot 10^6$ т отходов добычи и обогащения руд с реализацией продукции на сумму свыше 13 109 руб.

Оцененный потенциал техногенных объектов предприятий цветной металлургии Урала — хвостов переработки — составляет более 350 тыс. т меди, около 210 тыс. т цинка, 150 т серебра, а также золото и редкие земли. Почти 70% всех россыпных месторождений Магаданской области являются техногенными образованиями.

В хвостах обогащения полиметаллических руд теряется (% отн.): 31,64–80,36 Mo; 6,36–18,57 Cd; 14,64–81,48 In; 67,78–97,87 Ga; 69,37–92,48 Ge; 51,09–95,88 Tl; 18,67–80,29 Sb; 22,93–57,38 Se; 52,25–94,09 Te; 71,75–93,66 Re; 39,88–83,58 Bi; 58,01–78,27 Hg. В случае организации пиритной флотации можно значительно повысить извлечение Se (от 10 до 47%), Te (от 5 до 22%) и в той или иной степени (от 5 до 15%) — извлечение ряда других компонентов (In, Tl, Bi и др.).

При обогащении медных руд извлечение Mo, Cd, Sb, Se, Te, Re колеблется в достаточно широком диапазоне значений. Практически полностью остаются в хвостах флотации In, Ga, Ge, Tl, Bi, Hg. В хвостах обогащения медных руд теряется (% отн.): 28,72–92,59 Mo; 22,54–92,08 Cd; 79,09–97,31 In; 81,42–99,54 Ga; 92,08–98,44 Ge; 92,08–98,35 Tl; 56,49–96,88 Sb; 6,28–49,33 S; 43,43–99,54 Se; 73,24–97,00 Te; 47,88–96,18 Re; 89,59–97,15 Bi; 89,44–99,9 Hg.

Хвосты обогащения состоят в основном из содержащихся в руде порообразующих минералов и рудных минералов в виде сростков сульфидов меди, свинца, цинка и железа. Их складывают в хвостохранилища для хранения. В хвостохранилище сростки сульфидов подвергаются выветриванию и выщелачиванию. Причем эти процессы в хвостохранилище из-за мелкого размера частиц отходов идут более интенсивно, чем во вскрышной породе, не подвергнутой вскрытию измельчением и обработке химическими реагентами.

В хвостах обогащения руд цветных металлов доля не извлеченных компонентов от их количества в исходной руде составляет соответственно (средние и максимальные значения), %: олова — 35 и 58; вольфрама — 30 и 50; цинка — 26 и 47; свинца — 23 и 39; молибдена — 19 и 53; меди — 13 и 36; никеля — 10 и 25. Показатель извлечения основных полезных ископаемых в России составляет 65–78%, а попутных элементов (в цветной металлургии) — от 10 до 30%.

В то же время за рубежом из отходов с помощью нетрадиционных технологий (различных видов выщелачивания) получают более 40% годового объема меди, 35% золота и значительную долю других металлов.

Хвосты обогащения медно-никелевых руд Норильского рудного узла содержат промышленные, с точки зрения современных технологий переработки, концентрации платиноидов, золота и серебра.

На обогатительных фабриках, перерабатывающих вольфрамо-молибденовые руды, не извлекаются от 22 до 60% меди, до 81% висмута, до 62% тантала, а также золото, серебро и другие элементы. На крупнейшем Тырныаузском комбинате, добывающем и перерабатывающем вольфрамо-молибденовые руды, кондиционными считаются руды с содержанием $> 0,1\% \text{WO}_3$. В хвостах его содержание превышает 0,04%. На долю кондиционных руд приходится всего 13,5% всей добытой горной массы. В этих рудах содержится лишь 34,6% полезного компонента. Некондиционные руды (86,5% добытой горной массы) уходят в отвал, унося с собой 65,4% металла, содержащегося в эксплуатационном блоке.

Изучение технологической пробы некондиционной руды Тырныаузского месторождения показало, что отвалы некондиционной руды — полноценное техногенное месторождение, пригодное для отработки, причем со значительно меньшими затратами, чем месторождения коренных руд.

В целом на обогатительных фабриках вольфрамо-молибденовой подотрасли накоплено значительное количество хвостов флотационного и флотационно-гравитационного обогащения, которые содержат около 400 тыс. т молибдена и более 100 тыс. т вольфрама. Из общего объема лежалых молибденсодержащих хвостов более половины составляют хвосты с промышленным содержанием молибдена 0,012–0,02%, в остальной массе содержание молибдена менее 0,005%.

Большие перспективы связаны с переработкой техногенных месторождений драгоценных металлов — золота и платины.

По ориентировочной оценке, в отходах медной, свинцово-цинковой, никель-кобальтовой, вольфрамо-молибденовой, оловянной, алюминиевой подотраслей промышленности содержится более 8,0 млн т меди, 9,0 млн т цинка, 1,0 млн т свинца, 2,5 млн т никеля, 33,5 млн т Al_2O_3 , 600 тыс. т олова, 200 тыс. т молибдена, около 1 тыс. т золота и 12 тыс. т серебра. Резервы полезных компонентов в накопленных отходах равноценны открытию многих новых месторождений.

В структуре запасов техногенного генезиса, учтенных Государственным балансом запасов (ГБЗ), преобладают золотосодержащие техногенные объекты, а также оловянные, железорудные, мусковитные, медные и вольфрамовые техногенные месторождения.

Несмотря на рост объемов использования (обезвреживания) отходов более чем в два раза, из каждой тонны отходов используется или обезвреживается менее половины. Гораздо лучше ситуация в обрабатывающем производстве: металлургии и производстве готовых металлических изделий, где снизился рост образования (на 6,9%) и накопления (на 29,6%) отходов при росте объемов производства на 18%.

Следует отметить, что официальный учет по видам экономической деятельности не позволяет получить более точную информацию о состоянии проблемы, например, по горно-металлургическим компаниям, занимающимся как добычей, так и металлургической переработкой полезных ископаемых. Поэтому статистические данные по виду деятельности «металлургическое производство и производство готовых изделий» впитывают в себя показатели по переработке вторичных ресурсов.

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Удовлетворение растущих потребностей общества в материальных, духовных и других благах требует своевременного развития промышленного производства, которое невозможно без использования природных ресурсов. Ежегодно на каждого человека в России добывается не менее 20 т различного минерального сырья. Причем этот показатель непрерывно растет. Добыча полезных ископаемых в мире удваивается каждые 15 лет.

В то же время эксплуатируемые месторождения постепенно истощаются, снижается количество и качество извлекаемых из них компонентов, уменьшается производительность обрабатывающих их предприятий.

Так, например, исчерпание богатых залежей марганцевых руд привело к тому, что среднее содержание марганца в сырье снизилось с 25 до 22%, и теперь в среднем для производства одной тонны марганцевой руды требуется извлекать из недр и перерабатывать более 20 т горной массы.

Для ряда исчерпываемых месторождений еще не найдены альтернативные источники в природе. Вновь открываемые ресурсы нередко характеризуются худшими горнотехническими условиями и расположены в труднодоступных районах. Поэтому затраты на добычу полезных ископаемых с каждым годом возрастают. Таким образом, вполне обоснованным является вопрос об изыскании всевозможных резервов получения минерального сырья.

В соответствии с Государственным докладом «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 году» в сфере видов экономической деятельности в 2017 г. наибольшее количество отходов было утилизировано по виду деятельности «добыча полезных ископаемых» и составило 3017,7 млн т, что, учитывая объемы образовавшихся отходов, в этом секторе экономики составляет 52%. Но если рассматривать этот показатель по отношению ко всему объему накопленных в России отходов добычи полезных ископаемых, то он составит только 8,6%.

При этом доля обезвреженных отходов по виду экономической деятельности «добыча полезных ископаемых» составила 4,1 млн т, или 0,07% от годового объема образовавшихся отходов. Объем утилизированных отходов составил 52,15 млн т, или 0,9%.

В период с 2010 по 2017 г. наблюдался рост объемов использования и обезвреживания отходов горнодобывающей промышленности с 1723,6 млн т в 2010 г. до 3021,70 млн т в 2017 г., или на 75%.

Классификация методов подготовки и переработки отходов горного производства представлена на схеме (рис. 16.1).

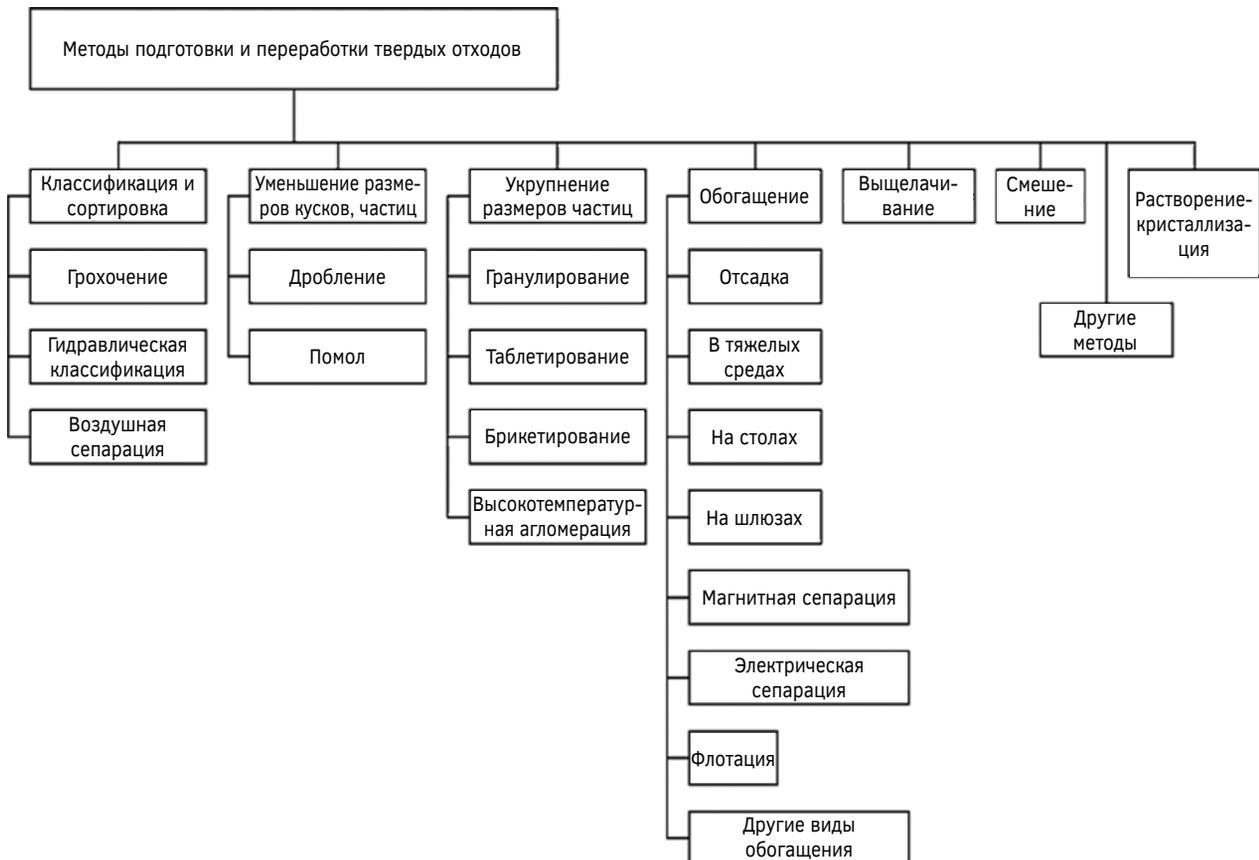


Рис. 16.1. Классификация методов подготовки и переработки отходов горного производства

Согласно ИТС 25–2017, задачам разработки и внедрения новейших ресурсосберегающих технологий (а это один из критериев отнесения технологий к наилучшим доступным технологиям (НДТ)) по всему циклу — от добычи через обогащение, металлургический передел и до производства конечной продукции, а также использования вторичного сырья — отнесены, в частности:

- ревизионное апробирование хвостохранилищ и отвалов на содержание в них попутных ценных компонентов, переоценка их и, при положительных результатах, — проведение геологоразведочных работ с разработкой технико-экономического обоснования повторного обогащения накопленных хвостов обогащения и заскладированных пород;
- более полное использование на экономической основе попутно добываемых вскрышных пород.

Также пустые породы можно направлять на производство строительных материалов. Строительные материалы из отходов производства допускается использовать прямо на предприятии (например, для возведения дамб хвостохранилищ) либо направлять на продажу. Однако этот способ использования отходов характеризуется двумя важными недостатками.

Во-первых, объемы образования вскрышных пород крайне велики: в России на угольных разрезах за год формируется несколько сотен миллионов тонн в год. Это значительно превышает потребности внутреннего рынка в строительном сырье, которые можно произвести из пустых пород.

Во-вторых, вскрышные породы являются низкокачественным строительным сырьем: в частности, они не характеризуются однородным составом. В связи с этим из таких пород можно произвести лишь достаточно низкокачественные строительные материалы, область применения которых достаточно ограничена.

Отходы добычи и обогащения угля содержат определенное количество гуминовых веществ, которые являются основой гуминовых препаратов и могут служить для производства гуминовых удобрений. Эти препараты и удобрения улучшают физические свойства почв и способствуют накоплению гумуса. Однако извлечение гуминовых веществ требует определенной химической переработки. В частности, для извлечения гуминовых кислот из бурого угля необходимо провести центрифугирование, осаждение, экстракцию и ряд промежуточных этапов. При этом значительная часть угля остается в виде отходов. Кроме того, гуминовые удобрения и препараты не являются незаменимыми: они вполне заменимы определенными видами минеральных и органических веществ.

Одна из значимых проблем — вовлечение в переработку окисленных железистых кварцитов. Перспективные решения в области вовлечения в переработку окисленных железистых кварцитов включают:

- применение магнитно-флотационных методов обогащения — флотационной доводки концентрата после магнитной сепарации;
- применение флотации обесшламленной руды с использованием катионных реагентов аминного состава;
- применение двухстадийной флотации.

Железорудный материал, измельченный до крупности 85% класса менее 50 мкм, поступает на первую стадию флотации раскрытых зерен, далее камерный продукт и хвосты поступают на вторую стадию измельчения до крупности 95% класса менее 50 мкм, проведение второй стадии флотации сопровождается выводом пенного продукта в отвал. Концентрат нерудных минералов с первой стадии флотации после перемешивания выводится в отвальные хвосты при выходе 45–50%.

Значимыми являются новые технологии складирования хвостов. Важным является селективное складирование отходов исходя из их качественных характеристик. К перспективным способам складирования хвостов следует отнести сгущение пульпы в сгустителях высокой производительности SUPAFLO. Успешная работа высокопроизводительных сгустителей обычно обеспечивается с помощью использования флокулянтов высокой молекулярной массы полиэлектролитного типа. Данные сгустители отличаются не только высокой производительностью, но и высокой плотностью сгущенного продукта (до 75% твердого), очень чистым сливом, возможностью автоматического регулирования и контроля процесса сгущения. Принципиальная технологическая схема представлена на рис. 16.2.

К новым технологиям складирования хвостов можно отнести пастовые сгустители, которые обеспечивают отсутствие воды на поверхности хвостохранилища, снижение стоимости ограждающих дамб, снижение пылеобразования, быструю рекультивацию. На отечественных и зарубежных предприятиях (Высокогорском, Гайском и других ГОКах) применяют технологию размещения (намыва) отходов обогащения руд без предварительной подготовки в отработанных пространствах карьеров под защитой возведенного искусственного массива. В этом случае карьер выполняет роль поверхностного хвостохранилища.

Большинство разновидностей вскрышных пород имеет многоцелевое назначение: четвертичные суглинки можно использовать при рекультивации хвостохранилищ или карьера в целях создания противодиффузионного экрана; пески можно отправлять на заводы по

производству силикатного кирпича, газосиликатных стеновых блоков и перекрытий, использовать в строительных работах, а крупнозернистые разности песков — применять в литейном производстве; мел можно отправлять на производство извести, цемента, удобрений, красок, а также на меловой завод, где после переработки и обогащения — транспортировать в химическую, бумажную, пищевую и парфюмерную промышленность; скальные породы (кристаллические сланцы и кварцито-песчаники) можно использовать для производства различных фракций дорожного и строительного щебня.

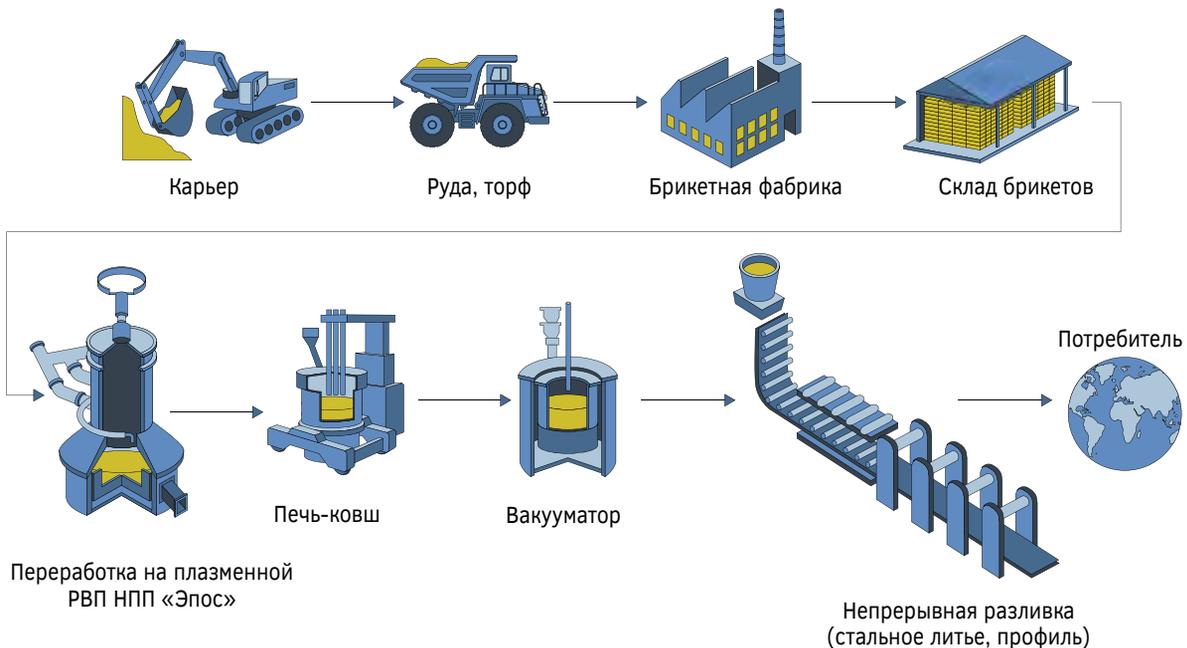


Рис. 16.2. Принципиальная технологическая схема складирования хвостов путем сгущения пульпы в сгустителях высокой производительности SUPAFLO

При обогащении полезных ископаемых образуются отходы, которые представляют собой взвесь мелкодисперсных твердых частиц в воде. От обогатительной фабрики хвосты направляют гидротранспортом в хвостохранилище — сложное гидротехническое сооружение, являющееся неотъемлемой частью всего горно-обогатительного производства. По сути это уже новый вид месторождения — техногенное. Хвостохранилища представляют собой скопления отходов горно-перерабатывающей промышленности. Объем накопленного в них материала оценивается астрономическими цифрами. Они также являются перспективными по содержанию и запасам полезных компонентов по сравнению с месторождениями: отвалами горнодобывающих предприятий являются хвосты обогащения руд черных и цветных металлов.

Хвосты — это отходы обогащения полезных ископаемых, в которых содержание ценного компонента, естественно, ниже, чем в исходном сырье, поскольку в них преобладают частицы пустой породы. Твердая фаза хвостовой пульпы представлена смесью минеральных частиц разного размера — от 3 мм до долей микрона. Состав частиц и их плотность зависят от минерального состава пород, вмещающих полезное ископаемое. В настоящее время в хвостохранилищах ГОКов КМА заскладировано около 700 млн т отходов обогащения железистых кварцитов, содержащих различные ценные компоненты, а на Магнитогорском ГОКе накоплено около 147 млн т. По имеющимся в настоящее время сведениям, материал железосодержащих хвостохранилищ достаточно эффективно можно использовать в различных отраслях хозяйства.

Отходы обогащения более удобны для утилизации и использования, чем отвалы, поскольку они, во-первых, более однородны, а во-вторых, представляют собой уже дробленный, иногда фракционированный материал. Наиболее перспективны для использования в строительстве отходы, образующиеся при сухих способах обогащения: хвосты сухой магнитной сепарации, сухой гравитации. Хвосты сухой магнитной сепарации отличаются повышенной крупностью (20–70 мм) и пониженным содержанием металлов. После предварительной подготовки (рассева) их полностью используют в качестве щебня. Хвосты мокрой магнитной сепарации — это мелкодисперсные отходы, за год на горно-обогатительных комбинатах России их накапливается более 150 млн т.

ПЕРЕРАБОТКА ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ В ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ С УЧЕТОМ МЕЖОТРАСЛЕВЫХ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ

Деятельность, связанная с использованием (разработкой) горнопромышленных отходов («отходов добычи полезных ископаемых и связанных с ней перерабатывающих производств»), согласно Закону РФ «О недрах» от 21.02.1992 № 2395–1, относится к виду пользования недрами и не выделена в отдельную область управления.

Одной из проблем организационного характера является сложившаяся практика предоставления в пользование участков недр без учета возможностей разработки «техногенных месторождений», ранее сформированных отходами, т. е. не работает механизм ограничения на добычу полезных ископаемых при наличии в регионе источников техногенного минерального сырья данного вида.

Одним из аспектов проблемы является процедура предоставления в отработку образованных отходами техногенных месторождений, включающая весь комплекс работ по освидетельствованию, геологическому исследованию, проведению аукциона, получения лицензии и постановок на учет в Государственный баланс запасов (ГБЗ), предусмотренный для коренных месторождений. Такая процедура повышает продолжительность и стоимость всех работ для потенциального инвестора, в качестве которого чаще всего выступает малый и средний горный бизнес.

Причиной низкого уровня вовлечения в хозяйственный оборот горнопромышленных отходов является отсутствие экономических стимулов (позитивной и негативной мотивации) и коммерческого интереса к их переработке, обусловленных низкой стоимостью земли, недостаточным контролем за образованием и размещением отходов; фактически в этой сфере не работает механизм инвестиционного налогового кредита, льготного кредитования и налогообложения.

Практически единственным способом финансовой поддержки деятельности, связанной с отходами, в том числе горнопромышленными, до последнего времени были государственные целевые программы, представляющие собой форму государственной плановой деятельности и целевого распределения бюджетных ресурсов.

Самостоятельной серьезной проблемой является оценка горнопромышленных отходов в качестве вторичных ресурсов. Во-первых, в системе оценки полезных ископаемых доминирует геологический подход, в основе которого заложены требования к определенному содержанию и объемам полезных компонентов, а не к технологии их извлечения и переработки. Во-вторых, вызывает критику и качество геолого-экономической оценки полезных ископаемых, на основе которой устанавливаются категории запасов и основные требования к их промышленному освоению. Геолого-экономическая оценка носит вероятностный характер — например, при подсчете промышленных запасов твердых полезных ископаемых коренных месторождений ошибка в блоке может составлять 25–60%. Эта ошибка может быть еще больше при подсчете запасов техногенных месторождений с нарушенной структурой полезных ископаемых.

Двойное регулирование проявляется в том, что по отношению к недропользователю размещение (хранение и захоронение), использование горнопромышленных отходов

регулируется Федеральным законом «Об отходах производства и потребления» и квалифицируется как деятельность, связанная с обращением отходов. В то же время Закон «О недрах» использование горнопромышленных отходов квалифицирует как деятельность, связанную с пользованием недрами, что предусматривает определенные процедуры при оформлении прав на использование отходов. Транспортирование, складирование горнопромышленных отходов в отвалах и специальных сооружениях также относится к основным видам деятельности недропользователя.

Учет горнопромышленных отходов по экологическому и горному законодательству ведется по различным классификационным признакам отходов. Основными параметрами, характеризующими отходы с позиции экологического законодательства, являются вид, объем, содержание вредных компонентов, класс опасности, места размещения отходов. Нормативная база горного законодательства, хотя и оперирует термином «отходы горнодобывающих и связанных с ними перерабатывающих производств», но не раскрывает содержание этого понятия, очевидно, в силу того, что объектами учета являются не массы отходов, а содержащиеся в них запасы полезных ископаемых и полезные компоненты, учет которых предусмотрен Государственным балансом запасов.

Различия проявляются в принципах учета движения горнопромышленных отходов: согласно экологическому законодательству, учет ведется по стадиям жизненного цикла отходов (начиная от сбора и заканчивая использованием или захоронением отходов). Горным законодательством предусматривается иная система, основанная на учете движения запасов полезных ископаемых (в том числе и в отходах горнодобывающих и связанных с ними перерабатывающих производств), путем постановки на баланс, перевода запасов из балансовых в забалансовые (и обратно), списания с баланса запасов в виде потерь.

Таким образом, на сегодняшний день учет горнопромышленных отходов и учет запасов, содержащихся в отходах горнодобывающих и связанных с ними перерабатывающих производств, представляют собой самостоятельные, фактически изолированные друг от друга системы учета. Такое положение затрудняет обмен информацией и согласование межотраслевых и внутриведомственных интересов, усложняет деятельность недропользователей по использованию отходов и распоряжению ими, ограничивает доступ к отходам организаций, обладающих передовыми технологиями их переработки, что не способствует снижению накопления отходов.

Отнесение вещи к отходам предполагает отсутствие цели использования вещи и желание владельца от нее избавиться. Эти признаки отражены в определении ГОСТ Р ИСО 14050–2009, статья 3.12 — «Отходы (waste): вещества или предметы, от которых владелец хочет или должен избавиться», что, в частности, соответствует дефиниции «отходы» в директиве ЕС по отходам (Council Directive 91/156/ЕЕС, 1991). Владельцем отходов является тот, кто их произвел, либо тот, кому переданы права владения. В национальном стандарте Российской Федерации отходы определены как «остатки продуктов или дополнительный продукт, образующиеся в процессе или по завершении определенной деятельности и не используемые в непосредственной связи с этой деятельностью» (ГОСТ Р 53691–2009)».

В отношении идентификации отходов горного производства сложилась парадоксальная ситуация: несмотря на то, что переработка отходов горного производства относится к виду пользования недрами, горное законодательство не позволяет определить и объективно идентифицировать отходы. Например, применяемая дефиниция «отходы добычи полезных ископаемых и связанных с ней перерабатывающих производств» не соответствует определению, применяемому, например, в государственном статистическом учете, где применяется понятие «отходы производства и потребления», которые учитываются по видам экономической деятельности. А широко используемый термин «техногенное месторождение» не имеет юридического определения. В конечном итоге такие «недочеты» приводят к нарушению правовых коммуникаций, сдерживают формализацию законодательства — порождают противоречия как между отдельными нормами, так и между отдельными отраслями права.

Владение отходами для недропользователя не означает, что владелец обязан их использовать и может ими распоряжаться: право собственности на отходы ограничено правом пользования (использования) отходами, которое не может быть передано третьим лицам в силу отнесения деятельности с отходами к виду пользования недрами. Более того, Законом «О недрах» предусмотрена норма, обязывающая недропользователей хранить отходы, если нет возможности их использовать. Действующее горное законодательство в отношении отходов горного производства определяет «правила игры», выполнение которых не способствует снижению образования и накопления отходов, а противоречия с положениями экологических нормативно-правовых актов, в первую очередь Закона «Об отходах производства и потребления», зачастую дезориентируют и дестимулируют недропользователей.

В основе этих противоречий — различные взгляды на отходы: как на потенциальные минеральные ресурсы, которые могут быть вовлечены при благоприятных условиях в переработку в целях добычи (извлечения) из них полезных компонентов и необходимые для развития горного производства и конкретной компании (продления ее жизненного цикла) — и как на источник негативного воздействия на окружающую среду.

Серьезную институциональную проблему в России представляет высокая степень монополизации бизнеса в минерально-сырьевом комплексе, создающая барьеры для привлечения в сферу переработки отходов организаций малого и среднего бизнеса. По официальным статистическим данным, доля малых и средних организаций по добыче полезных ископаемых составляла в 2014 г. один процент, а доля занятых в этой сфере — 2,1% — наименьшие показатели в структуре совокупности по всем видам деятельности. За последние годы ситуация в лучшую сторону не изменилась. Именно малый и средний бизнес обладает большей инновационной активностью, способностью более гибко реагировать на изменения экономической среды; в сферу его предпринимательских интересов попадают техногенные объекты, не представляющие ценности для крупных компаний. Основными проблемами участия малого и среднего горного бизнеса в сфере управления горнопромышленными отходами, в первую очередь, являются правовые ограничения, противоречивость действующего законодательства, слабый интерес со стороны государства.

Содержание отвалов и хвостохранилищ также требует от предприятий определенных экономических издержек. Учитывая, что в твердые отходы уже вложены средства по добыче, транспортировке и т. д., можно заключить, что неиспользование их полезных качеств приводит к экономическим потерям, которые несут отдельные предприятия и общество в целом.

До настоящего времени вопросам утилизации твердых минеральных отходов уделялось недостаточное внимание. Для этого существовали определенные причины, в частности:

- ведомственный и отраслевой подход к добыче различных видов полезных ископаемых;
- недостаточная ответственность предприятий при потреблении ими природных ресурсов;
- более низкие, в сравнении с существующими кондициями, содержания побочных минеральных компонентов;
- отсутствие приемлемых технологий и другие.

Замедленное развитие утилизации горных отходов в СССР было обусловлено также недостаточным вниманием к этому вопросу со стороны государственных органов.

В мире из всех капитальных вложений на охрану природы в среднем около 25% выделяется на переработку и захоронение твердых отходов, а на охрану воздуха и вод, соответственно, 14 и 61%.

В странах с особенно развитой промышленностью утилизации отходов уделяется еще большее внимание. В США, например, с 1970 по 1975 г. на очистку вод и воздуха ассигновалось, соответственно, 36 и 23%, и 40% — на борьбу с накоплением твердых отходов.

В Советском Союзе такая статья затрат вообще не предусматривалась. С 1976 по 1980 г. было выделено: 76% на очистку вод, 13% на охрану почв, лесов, заповедников и рыбного поголовья, 9% на охрану воздушного бассейна и 2% на охрану природных богатств.

До конца XX в. в нашей стране утилизация твердых отходов была одним из отстающих направлений в области охраны окружающей среды. Как отмечалось в Постановлении ЦК КПСС и Совета министров СССР «О коренной перестройке дела охраны природы в стране» от 7 января 1988 г., № 32, «проблемы утилизации горных отходов и другие вопросы ресурсосбережения слабо отражались в составе планов государственных целевых научно-технических программ».

Этот процесс отразился и на более низких уровнях иерархии народного хозяйства. Ряд министерств, ассоциаций, концернов и предприятий, ссылаясь на недостаток капитальных вложений и необходимость увеличения средств на социально-культурные нужды, резко сократили выделение ассигнований на строительство объектов межотраслевого назначения, обеспечивающих комплексное использование минерального сырья. Так, Минметаллургии СССР (по данным Госкомстата СССР) за 1986–1989 гг. сократило ассигнования на эти цели почти в 15 раз.

Ввиду обострения экологической ситуации в стране государственная деятельность в этом направлении заметно активизировалась.

Одним из направлений Государственной программы охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов СССР на 1991–1995 гг. и на перспективу до 2005 г. являлась «Разработка и реализация мер по ресурсосбережению и активному переводу промышленности на малоотходные, безотходные технологические процессы и комплексные безотходные производства».

В основных направлениях научно-технического прогресса поставлена задача по комплексному освоению месторождений твердых полезных ископаемых, среди результатов которой должна быть высокоэффективная, ресурсосберегающая, малоотходная и экологически безвредная технология извлечения твердых полезных ископаемых из недр.

Поскольку одной из целей использования техногенных месторождений является удовлетворение общественных потребностей в минеральном сырье, академик К. Н. Трубецкой предложил решать вопрос о целесообразности эксплуатации того или иного искусственного источника, используя метод «замыкающих затрат». В подобной ситуации техногенные месторождения приводятся в сопоставимый вид с естественными, при условии учета среди других факторов и экологического эффекта.

По данным Государственного доклада «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 году», инвестиции в основной капитал, направленные на охрану окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов, в 2017 г. (в фактически действовавших ценах) в секторе экономики «добыча полезных ископаемых» составили 47 330,1 млн руб. и с 2012 г. выросли более чем в 2,3 раза. При этом следует отметить, что в этих инвестициях более 99% — это собственные средства предприятий.

Текущие затраты на охрану окружающей среды составили 50 217,1 млн руб., которые выросли за период 2012–2017 гг. с 41 430 млн руб. до 50 217,1 млн руб. в 2017 г., или на 21%.

СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ РЕСУРСО- И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

Основными видами использования вторичных ресурсов горной промышленности являются: засыпка разрезов, карьеров и шахтных провалов. Оценивая энергоэффективность данного вида использования вторичных ресурсов, необходимо учитывать расстояние транспортировки, которое может быть оптимизировано при учете данного направления использования отвальной массы при проектировании горного предприятия. В то же время необходим анализ ресурсной эффективности с точки зрения оценки ценности горной массы, используемой для засыпки разрезов, карьеров и шахтных провалов. В случае обнаружения объемов пород, которые можно, при складывающейся рыночной ситуации и с учетом имеющихся технологий, использовать с формированием большей добавочной стоимости, то данные вторичные ресурсы должны поступать на переработку.

Наиболее распространено использование горной массы в строительной индустрии через прямое использование в качестве строительного материала без специальной подготовки (например, щебень или песок в дорожном строительстве. В данном случае, оценивая энергоэффективность, необходимо учитывать энергозатраты на экскавацию и транспортировку, которые могут быть оптимизированы при учете данного направления использования отвальной массы при проектировании горного предприятия. Говоря о ресурсной эффективности, необходимо оценить ценность горной массы, используемой напрямую, без переработки, в качестве строительного материала. В случае целесообразности, при складывающейся рыночной ситуации и с учетом имеющихся технологий, использования для производства продукции с большей добавочной стоимостью данные вторичные ресурсы должны поступать на переработку.

В случае переработки вторичных ресурсов горной промышленности в качестве сырья для производства строительных материалов (оглопорит, керамические изделия, цемент, пористый наполнитель для бетонов) возрастают энергозатраты и выявляется негативное воздействие на окружающую среду. Но следует отметить, что в этом случае энергозатраты и степень негативного воздействия на окружающую среду будут на порядок ниже, чем при добыче сырья из новых месторождений.

В случае переработки вторичных ресурсов горной промышленности в целях доизвлечения полезных компонентов руд (редкоземельные элементы, различные виды металлов и химического сырья) с применением металлургических технологий и выщелачивания соответственно возрастают энергозатраты и степень негативного воздействия на окружающую среду.

В табл. 16.5 представлено сравнение технологий переработки вторичных ресурсов горной промышленности по показателям ресурсо- и энергоэффективности.

Таблица 16.5. Сравнение технологий переработки вторичных ресурсов горной промышленности по показателям ресурсо- и энергоэффективности

№	Технология	Ресурсо-емкость	Энерго-эффективность	Экономичность	Экологичность
1	Засыпка разрезов, карьеров и шахтных провалов	Высокая	Высокая	Низкая	Высокая
2	Использование в качестве строительного материала	Высокая	Высокая	Низкая	Высокая
3	Производство стройматериалов	Средняя	Средняя	Средняя	Средняя
4	Доизвлечение полезных компонентов руд	Малая	Низкая	Высокая	Низкая

ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ В ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Техногенное сырье — конкурентоспособный, перспективный минеральный ресурс, использование которого по инновационным технологиям обеспечивает не только значительный технико-экономический эффект, но и достигаемый попутно экологический эффект как естественное следствие нового уровня требований современного производства. При этом следует отметить, что в настоящее время в области переработки отходов горно-обогатительных предприятий ведутся исследования по созданию новых технологий извлечения ценных компонентов из отходов переработки руд, комбинированию физико-химических способов обогащения (флотация, электрохимия и т. д.) с химико-металлургическими методами (пиро- и гидрометаллургия, автоклавное выщелачивание, биологическое окисление).

В настоящее время определились следующие направления создания безотходных (или малоотходных) производств:

- разработка принципиально новых технологических схем и методов промышленного производства, исключающих выброс отходов в окружающую среду;
- создание замкнутых технологических схем с многократным использованием воды и технологических газов;
- создание системы переработки отходов производства, которые рассматриваются как вторичные материальные ресурсы, с организацией крупных региональных территориально-промышленных комплексов с замкнутой структурой потоков сырья для глубокой переработки.

Пришло время централизованной реализации и тиражирования технологии глубокой безотходной разработки природно-техногенных месторождений автономными мобильными комплексами с извлечением всех полезных компонентов и захоронением (консервацией) вредных компонентов (элементов-токсикантов) с последующей рекультивацией и возвращением в хозяйственный оборот освобожденных от них территорий.

Методика проектирования комплексов позволяет адаптировать технологию глубокой безотходной переработки к условиям практически любого известного техногенного месторождения, включая глубокую переработку шламохранилищ углеобогащительных фабрик в целях производства тонкодисперсного водоугольного и брикетированного топлива, строительных материалов и удобрений, а также их использования в цементной промышленности при производстве мелоглинистого шлама и многих других видов продукции.

Реализация концепции глубокой переработки рассмотрена на примере техногенных месторождений КМА.

Предложена технология отработки техногенных и природно-техногенных месторождений с помощью мобильных технологических комплексов на базе оригинальных технических решений (рис. 16.3).

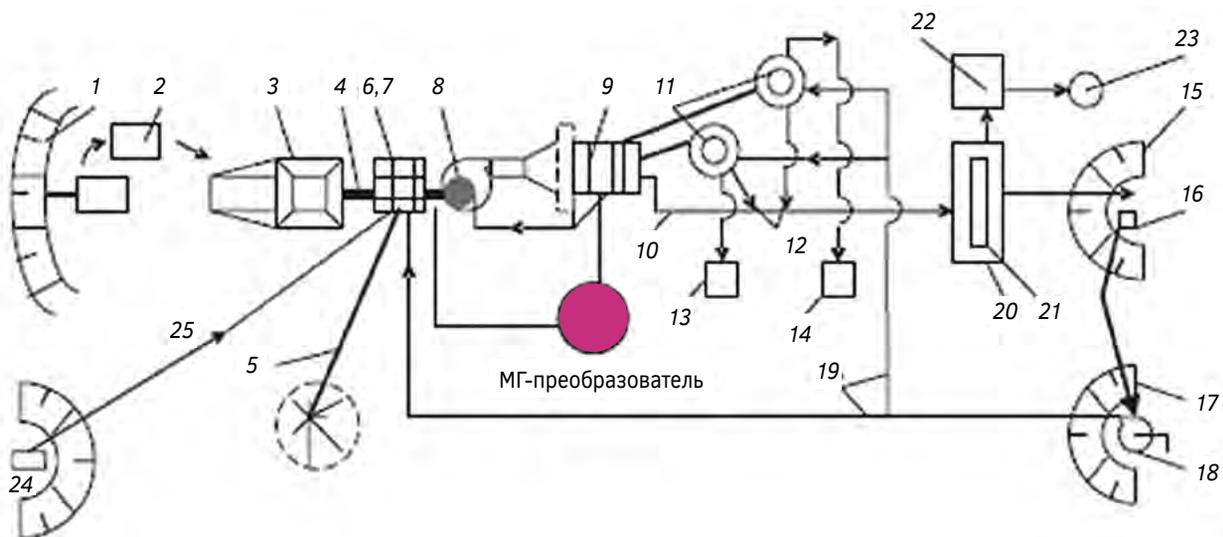


Рис. 16.3. Схема цепи аппаратов автономного мобильного технологического комплекса по переработке и утилизации техногенных и природно-техногенных месторождений

- 1 — хвостохранилище; 2 — автотранспорт; 3 — бункер; 4 — питатель ленточный; 5 — конвейер ленточный; 6 — виброгрохот; 7 — зумпф; 8 — роторная мельница; 9 — многопродуктовый гидрокласификатор (МГК); 10 — сбросной пульповод; 11 — концентраты; 12 — сбросной водовод; 13 — тяжелые металлы; 14 — промпродукт (драгметаллы, ртуть); 15 — отвал; 16 — сбросной колодец; 17 — прудок-отстойник; 18 — насос обратного водоснабжения; 19 — напорные водоводы; 20 — тонкослойный отстойник; 21 — коагулятор; 22 — узел выделения радионуклидов и токсинов; 23 — могильники РАО и токсинов

Работа над последним направлением началась еще в СССР и заняла более двух десятков лет. В результате удалось не только сформулировать новую концепцию глубокой безотходной переработки техногенных месторождений, но и разработать методы и технические средства ее реализации. Предлагаемый в настоящее время технологический комплекс сегодня включает проверенное на практике уникальное, не имеющее мировых аналогов оборудование. Он предназначен для глубокой переработки техногенного сырья с извлечением полезных компонентов (золота, платины, палладия, серебра; немагнитных железа, гематитов и др.) и удалением вредных примесей (ртутьсодержащих и тяжелых металлов, радионуклидов) из хвостов обогатительных фабрик предприятий цветной и черной металлургии. Все эти компоненты и обезметалленные отходы (хвосты) представляют собой достаточно ценную продукцию для металлургической, строительной, частично ювелирной и других отраслей промышленности и экономики в целом (рис. 16.4).

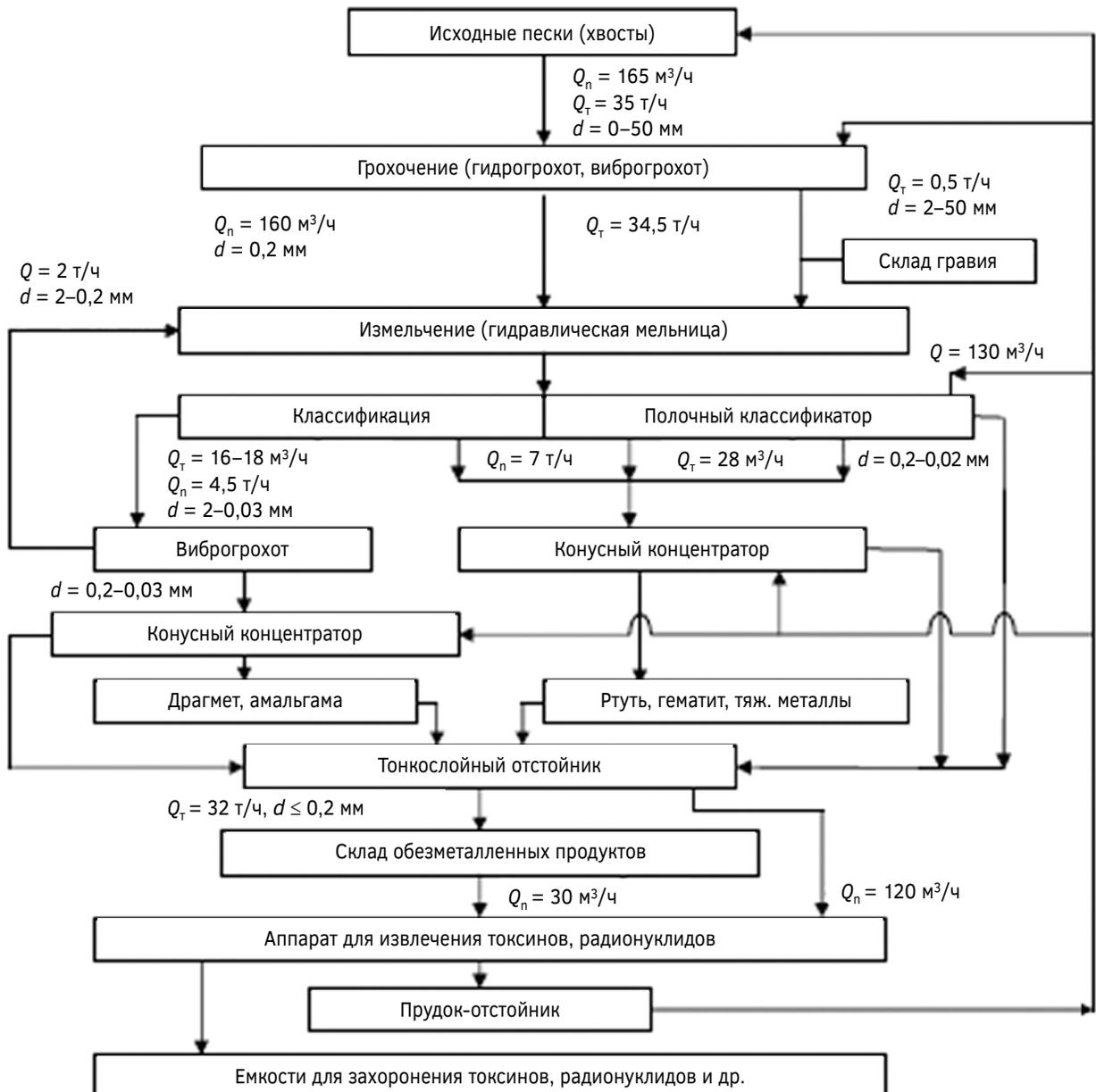


Рис. 16.4. Технологическая схема комплекса оборудования по глубокой переработке и утилизации техногенных отходов: хвостов, эфелей ОФ, ЗИФ, шламоохранилищ углеобогажительных фабрик

Таким образом, предлагаемая технология переработки техногенных отходов (хвостов обогащения, эфелей, шламохранилищ) позволяет обеспечить устранение и захоронение вредных примесей, в том числе и в подземных выработанных пространствах после предварительного их сгущения, что также обеспечивается техническими средствами, входящими в состав комплекса. Предлагаемая технология обеспечивает рентабельное и практически экологически чистое и безотходное производство с существенно меньшей себестоимостью основной продукции действующих горно-обогатительных предприятий цветной и черной металлургии России.

Возможность реализации этого резерва снижения себестоимости основной продукции ГОКов, ГМК и угледобывающих предприятий с одновременным устранением и обезвреживанием токсичных примесей из хвостов обогащения (эфелей) связана с использованием важнейшего принципа построения экотехнологии горного производства — замкнутого цикла обращения вещества.

Мобильный технологический комплекс состоит из трех принципиально новых устройств (рис. 16.3): роторной гидравлической (гидродинамической) мельницы (РГДМ), полочного многопродуктового гидроклассификатора (МГК) и центробежных концентраторов (КЦ).

Гидродинамическая мельница (МГД) представляет собой разновидность роторной гидравлической кавитационной мельницы, предназначенной для тонкого измельчения различных материалов любой прочности и абразивности. Мельница может обеспечивать измельчение зернистого материала до размера 0,1 мкм (характерная особенность: чем тоньше требуется измельчить исходный материал, тем эффективнее работает гидродинамическая мельница), а также смешивать различные жидкости, жидкости с газом и твердыми материалами.

Опытно-промышленные испытания мельницы производительностью ~ 100 т/ч подтвердили высокую эффективность измельчения. Вместе с тем потребовалось повысить износостойкость узлов мельницы. Эта задача решена путем применения метода электроимпульсного упрочнения рабочих поверхностей мельницы и специальных полимерных и металлических нанопорошковых материалов.

Технико-экономическое сравнение роторной гидравлической кавитационной мельницы (РГДМ) с серийно выпускаемыми отечественными и зарубежными вибро-шаровыми мельницами свидетельствует о том, что роторная гидравлическая мельница при одной и той же степени измельчения почти в пять раз меньше потребляет энергии в расчете на 1 т исходного материала. Ее масса в 30–90 раз, а размеры в 7–10 раз меньше, чем у наилучших вибро-шаровых мельниц. Кроме того, новая мельница легко вписывается в технологическую линию гидравлической переработки зернистых материалов, так как может всасывать и нагнетать исходную пульпу на высоту до 20 м и более.

Многопродуктовый полочный гидроклассификатор (МГК) обеспечивает эффективное разделение различных зернистых материалов при любой их крупности и плотности, в том числе и мелкодисперсных, а также производительное и качественное обогащение и разделение таких материалов по фракциям при различных гранулометрическом и химическом составах поступающей гидросмеси. Некоторые модификации полочного гидроклассификатора прошли стендовые испытания на разделение хвостов обогащения железорудных ГОКов КМА, а также внедрены в технологию обогащения и гидроклассификации песков, например, в Воронежском рудоуправлении.

В результате изучения процесса осаждения взвешенных зерен минералов в ламинарных потоках была выявлена возможность разделять сравнительно с высокой точностью мелко-зернистые материалы, а также осветлять загрязненные воды.

Была установлена зависимость распределения по зонам МГК различных компонентов гидросмеси (руды благородных и тяжелых металлов, ртутьсодержащих компонентов и других токсичных продуктов). Распределение определяется расчетным путем, позволяя установить

качественно-количественный график осаждения различных компонентов в различных зонах многопродуктового гидрокласификатора.

Горизонтальное размещение сгустителя с несколькими бункерными выпусками сгущенных продуктов по сравнению с вертикальными одnobункерными конструкциями полочных сгустителей позволили в 1,5–2 и более раза снизить общую габаритную высоту аппарата.

Центробежный концентратор выделяет тяжелые металлы, в том числе и ртутьсодержащие, а также золото и платиноиды из техногенных отходов (хвостов) обогатительных фабрик. При этом методе извлечение тяжелых металлов, в том числе ртутьсодержащих и драгметаллов, из хвостов составит 95–99%. После извлечения тяжелых металлов предоставляется возможность использовать отходы в качестве строительных материалов и, в частности, как закладочный материал для подземных горных работ. Земли, высвободившиеся из-под хвостохранилищ, после рекультивации могут использоваться под сельхозугодья, строительство и в других направлениях хозяйственного освоения.

Предлагаемая технология позволяет использовать экологически чистые растворители для перевода драгметаллов в ионную форму и извлекать их на селективных ионообменных фильтрах, имеющих волоконную основу. Перспективным представляется также применение керамических фильтров (которые были успешно опробованы).

Предлагаемый технологический комплекс и входящее в него оборудование не имеют аналогов в мировой практике гидравлической переработки зернистых материалов по своей эффективности, малой материалоемкости и стоимости. Новизна технических решений защищена более чем десятью авторскими свидетельствами на изобретения и патентами.

Перспективным направлением является предварительная сортировка отходов производства, которая позволяет отделить потенциально полезную продукцию от горнопромышленных отходов, подлежащих окончательному захоронению (например, закладке). Это также позволяет сократить объем окончательно забораниваемых отходов. Кроме того, отделение инертных отходов от опасных (например, размещение которых может привести к формированию кислотных стоков) позволяет сократить объем работ, связанных с утилизацией опасных отходов.

Обезвоживание может применяться для подготовки пастообразной смеси, размещаемой в выработанных пространствах.

Физико-химические меры могут применяться для снижения опасности определенных видов отходов. Например, десульфуризация позволяет снизить опасность формирования кислотных стоков.

На отечественных и зарубежных предприятиях (Высокогорском, Гайском и других ГОКах) применяют технологию размещения (намыва) отходов обогащения руд без предварительной подготовки в отработанных пространствах карьеров под защитой возведенного искусственного массива. В этом случае карьер выполняет роль поверхностного хвостохранилища (рис. 16.5).

Недостатками этого варианта утилизации являются:

- 1) низкая производительность по твердому;
- 2) возможность залпового прорыва пульпы в подземные горные выработки;
- 3) огромные затраты на возведение барьерного целика и гидроизолирующих перемычек, а также на откачку воды;
- 4) экологические проблемы — испарение воды, насыщенной реагентами, с поверхности хранилища; гипергенез и техногенез отходов переработки, влекущие за собой потери ценных компонентов.

Качественной и принципиальной новой является идея замены существующего подхода к складированию отходов в хвостохранилищах на их размещение в карьерном и подземном пространстве. В большинстве развитых стран законодательство не позволяет размещать отходы обогащения в местах, где они могут нанести вред окружающей среде и живой природе, что существенно повышает стоимость процессов управления отходами и обязывает недропользователей отказаться от складирования хвостов обогащения руд путем придания им дополнительных полезных свойств.

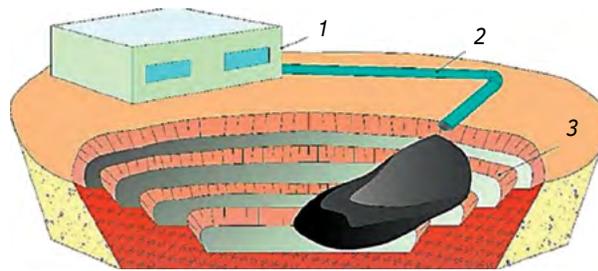


Рис. 16.5. Укрупненная технологическая схема утилизации отходов переработки руд в выработанном пространстве карьера:

1 — обогатительная фабрика; 2 — пульпопровод; 3 — выработанное карьерное пространство

Складирование хвостов в выработанном пространстве рудников позволяет избежать необходимости отвода дополнительных территорий для строительства хвостохранилищ и способствует рекультивации нарушенных земель. Такая технология характеризуется невысокими затратами при отсутствии риска прорыва хвостохранилищ. Однако для устранения проблемы возможного загрязнения грунтовых вод требуется проводить обезвоживание хвостов.

Перспективные и широко применяемые технологии размещения отходов обогащения руд разработаны с появлением нового класса оборудования для обезвоживания текущих отвалных хвостов до состояния пасты — пластинчатых (рис. 16.6) и пастовых (рис. 16.7) сгустителей.

Технология пастовой закладки позволяет использовать выработанное пространство карьера, в том числе при комбинированной геотехнологии, в качестве емкости для складирования отходов обогащения руд. Минимальное выделение воды из пастовой закладочной смеси снижает риск затопления участка ведения подземных работ под дном карьера, что позволяет проводить рекультивацию его выработанного пространства на этапе развития подземных горных работ.

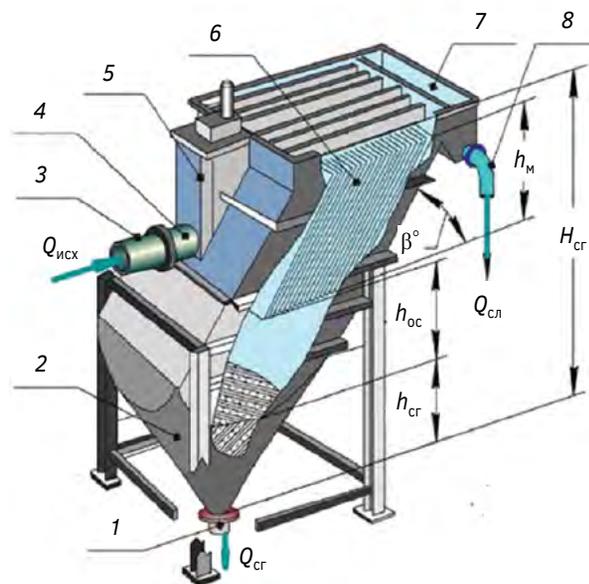


Рис. 16.6. Общий вид и параметры пластинчатого сгустителя:

1 — разгрузочный патрубок; 2 — бункер-накопитель; 3 — загрузочный трубопровод; 4 — входной патрубок; 5 — приемная емкость; 6 — наклонный модуль; 7 — сливной лоток; 8 — патрубок верхнего слива; $Q_{исх}$ — расход пульпы на входе в сгуститель; $Q_{ср}$ — расход сгущенной смеси; $Q_{сл}$ — расход осветленной воды; h_m — высота модуля; $h_{ос}$ — высота зоны осветления; $h_{ср}$ — высота зоны сгущения; $H_{ср}$ — высота сгустителя; β — угол наклона модуля пластин



Рис. 16.7. Общий вид пастового сгустителя

Особенность технологии размещения текущих хвостов обогащения руд в выработанное горное пространство состоит в том, что они подаются в карьерное или подземное пространство в виде продукта, обезвоженного (сгущенного) до состояния пасты (процент твердого около 70%), а для изоляции сооружается искусственный массив требуемой мощности. Также для защиты от затопления подземных выработок, имеющих связь с карьером, необходимо строительство водонепроницаемых перемычек (ВНП), обеспечивающих возможность откачки технологических вод, предотвращающих прорыв воды и жидкой пульпы хвостов в подземные выработки рудника. Реализация данной технологии сопряжена с увеличением водопритоков в подземные выработки, что требует установки дополнительных насосных установок в подземном руднике и плавучих насосных станций в образующихся в карьере прудках отстоя воды (рис. 16.8).

Использование отработанных карьеров для внутреннего отвалообразования является примером комплексного подхода к освоению участков недр Земли. Данный способ применяется для решения проблем сокращения затрат на транспортирование вскрышных пород и уменьшения изъятых территорий на поверхности Земли для размещения отходов добычи полезных ископаемых.

Использование выработанного пространства карьеров для размещения промышленных отходов различных отраслей промышленности позволит решить проблему изъятия земель, в том числе сельскохозяйственного назначения, необходимых под строительство специализированных полигонов.

Свою особенность имеет размещение хвостов обогащения в выработанном подземном пространстве. Организация такого способа утилизации требует для своей реализации двух условий: баланса объемов подземных пустот и складироваемых отходов, а также наличия известных технологий размещения этого вида отходов в подземном пространстве. Первое условие связано с состоянием выработанного пространства. При системах с открытым очистным пространством существует потенциальная возможность последующего погашения пустот путем заполнения отходами производства.

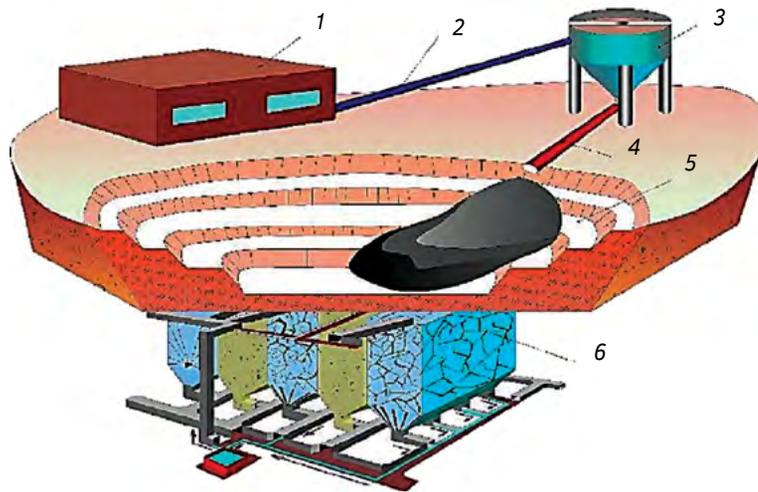


Рис. 16.8. Принципиальная технологическая схема размещения пастообразных хвостов в выработанном пространстве карьера при комбинированной геотехнологии:

1 — обогатительная фабрика; 2 — пульпопровод; 3 — пастовый сгуститель; 4 — трубопровод; 5 — выработанное пространство карьера; 6 — подземные горные выработки

При системах с закладкой выработанного пространства используют отходы переработки руд, как при формировании несущих массивов, так и в качестве сыпучей закладки. Ограничения в полном использовании хвостов для закладки подземного выработанного пространства создает их шламовая часть. Преодолевают это ограничение путем совершенствования способа подачи техногенной смеси в выработанное подземное пространство, используя добавки, связывающие воду и шламовую часть и соответствующим образом подготавливая закладочную массу. Используют механическую или пневматическую подачу обезвоженных материалов, гидравлическую подачу тиксотропных смесей.

Одна из наиболее распространенных схем утилизации текущих хвостов обогащения в выработанном подземном пространстве — это пастообразная закладка выработанного пространства рудника с установкой узла обезвоживания на дневной поверхности. Данная технология предусматривает строительство узла обезвоживания на промплощадке подземного рудника, строительство гидроизоляционных перемычек. Преимуществом данной технологии является отказ от складирования текущих хвостов в хвостохранилища, снижение экологической нагрузки на окружающие территории, использование оборотной воды. Основным недостатком являются высокие затраты на строительство комплекса обезвоживания, подземного закладочного комплекса (ПЗК), на транспортирование пастообразной закладочной смеси.

На рис. 16.9 приведена принципиальная технологическая схема утилизации в выработанном подземном пространстве обезвоженных до влажности 8% хвостов обогащения.

Данная технологическая схема применялась на Учалинском ГОКе при подготовке текущих хвостов обогащения для их дальнейшей утилизации в шахте.

Альтернативным вариантом утилизации обводненных тонкодисперсных отходов обогащения в шахте является размещение узла обезвоживания непосредственно в недрах Земли, особенно когда фабрика находится на значительном расстоянии от подземных выработок (например, Эльконский ГМК). Размещение оборудования для обезвоживания в недрах Земли является инновационным направлением, позволяющим: транспортировать пульпу по горизонтальным выработкам на дальние расстояния; складировать вредные токсичные вещества непосредственно в недрах; высвободить площади земель, занимаемых под размещение отходов обогащения; освоить объемы подземного пространства; вовлекать хвосты обогащения

для приготовления закладочных смесей вблизи закладываемых камер; исключить капиталовложения на строительство ПЗК и узла обезвоживания на поверхности. Естественно, при реализации данной технологии необходимо увеличение мощности насосов для обратного водоснабжения и откачки воды на фабрику.

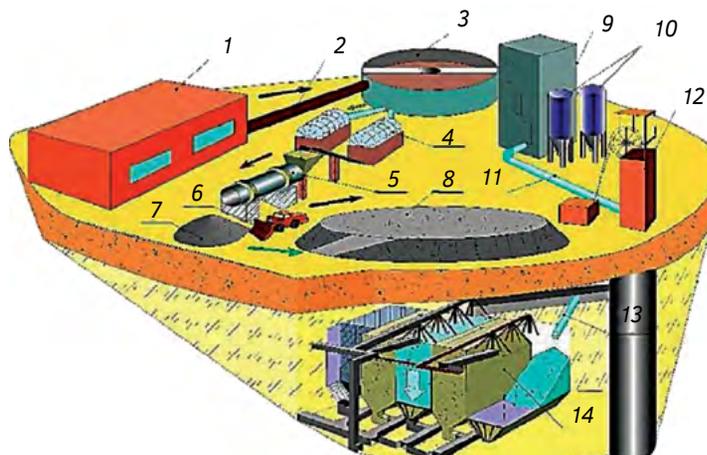


Рис. 16.9. Технологическая схема утилизации полностью обезвоженных хвостов обогащения в выработанном пространстве подземных камер:

- 1 — обогатительная фабрика; 2 — пульпопровод; 3 — радиальный сгуститель; 4 — дисковые вакуум-фильтры; 5 — барабанная сушилка; 6 — погрузочно-доставочная машина; 7 — высушенный кек; 8 — отвал; 9 — поверхностный закладочный комплекс; 10 — цементные силосы; 11 — закладочный трубопровод; 12 — копер; 13 — приемная воронка; 14 — закладываемое подземное пространство

Для рудных месторождений распространение получила засыпка внутреннего пространства располагающихся вблизи отработанных карьеров. Такой способ использования выработанного пространства применен на карьере «Старый Сибай» Башкирского медно-серного комбината, на Юго-восточном участке карьера «Объединенный» на Учалинском ГОКе, на карьерах объединений «Южуралникель», «Севбокситруда», Донского ГОКа и др.

При системах с открытым очистным пространством и с закладкой выработанного пространства существует потенциальная возможность последующего погашения пустот путем заполнения их отходами производства. При системах с закладкой возможно использование отходов как при формировании искусственных твердеющих массивов, так и в качестве закладочных материалов.

Вовлечение отходов добычи и обогащения руд в производство твердеющих закладочных смесей является важным направлением по пути к сокращению объемов накопления отходов.

Твердеющая закладка получила широкое применение благодаря своему основному преимуществу — возможности создания монолитного массива необходимой прочности. Широкое применение данной закладки сдерживает только экономический фактор. С повышением на мировом рынке цены на продукцию горной промышленности и с использованием в составе закладочной смеси более дешевого вяжущего компонента стало возможным применение данного способа закладки и при добыче низкоценного сырья. Твердеющая закладка на основе отходов добычи также применяется на Бурибаевском, Гайском и Красноуральском ГОКах.

На транспортирование закладочной смеси по трубопроводам оказывает положительное влияние содержание глинистых и пылевидных частиц. Данный факт обусловлен тем, что крупные фракции инертного заполнителя находятся во взвешенном состоянии, препятствуя расслоению раствора во время движения его по трубопроводу.

Применение хвостов обогащения для производства твердеющей, пастообразной или гидравлической закладки позволяет, с одной стороны, упростить технологическую схему производства закладочной смеси за счет отсутствия необходимости дробления и измельчения пород, а с другой — утилизировать хвосты обогащения в подземном пространстве, избегав, таким образом, опасностей, связанных с негативным влиянием материала хвостов на окружающую среду.

В России в настоящее время только ограниченная часть обезвоженных хвостов используется для закладки выработанного пространства на предприятиях Норильского горно-металлургического комбината, Уральской горно-металлургической компании, подземных рудниках Казахстана и др. (рис. 16.10).

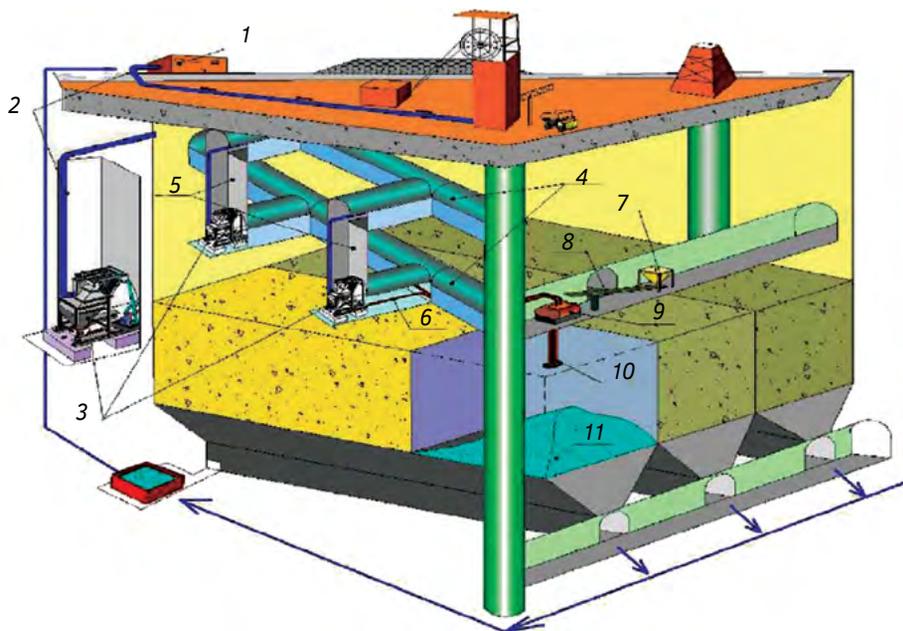


Рис. 16.10. Горнотехническая система с приготовлением закладочной смеси на основе обезвоженных хвостов обогащения руд в подземных выработках:

- 1 — обогатительная фабрика; 2 — пульпопровод; 3 — вертикальный сгуститель; 4 — горная выработка; 5 — вентиляционный восстающий; 6 — трубопровод для сгущенных хвостов; 7 — дозирующий бункер; 8 — конвейер; 9 — смеситель; 10 — закладочный трубопровод; 11 — закладочный массив

Из практики работы подземных рудников следует, что применение твердеющей закладки экономически оправдано при разработке медно-колчеданных месторождений и, как правило, приводит к снижению капитальных затрат на вскрытие месторождений и связанных с ним эксплуатационных расходов. Однако высокая металлоемкость закладочных комплексов предопределяет их стационарное расположение и ограничивает область применения систем с твердеющей закладкой. При этом постоянное перемещение очистных работ приводит к увеличению расстояния транспортирования твердеющей смеси, что требует дополнительных затрат на сохранение ее технологических свойств и на перемещение смеси.

Указанных недостатков лишена горнотехническая система, предусматривающая приготовление закладочной смеси в подземных горных выработках с использованием отходов от проходки горных выработок и радиометрической сепарации руд в качестве инертного заполнителя (рис. 16.11).

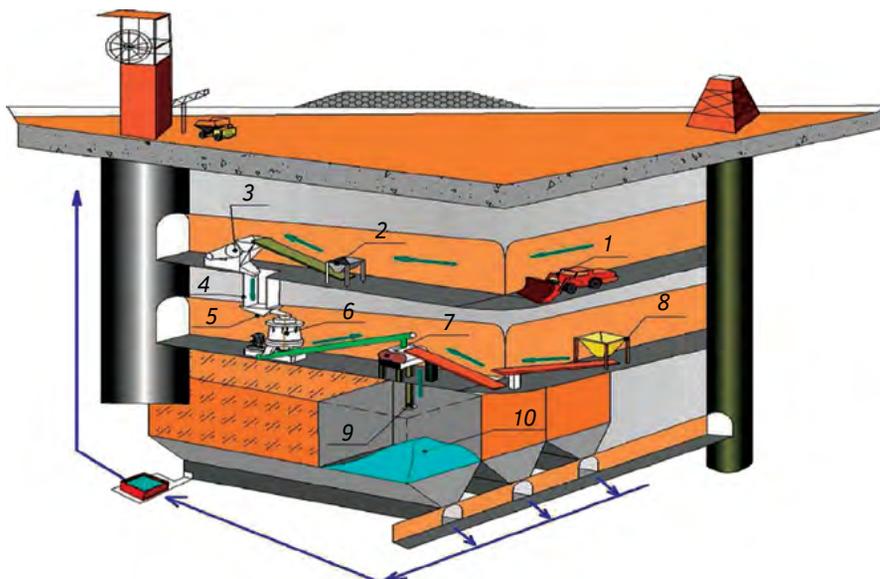


Рис. 16.11. Горнотехническая система закладки выработанного пространства на основе отходов горных работ, с подготовкой наполнителя в подземном выработанном пространстве: 1 — ПДМ; 2 — приемный бункер; 3 — щековая дробилка; 4 — рудоспуск; 5 — бункер-накопитель; 6 — конусная инерционная дробилка; 7 — смеситель; 8 — цементный силос; 9 — закладочная скважина; 10 — закладываемое выработанное пространство

Несмотря на огромный накопленный опыт в области создания новых технологий складирования отходов добычи и переработки руд, горнорудные предприятия весьма медленно внедряют в технологический процесс современные наработки. Это объясняется тем, что нововведения всегда требуют значительных капиталовложений, что значительно влияет на себестоимость добытой руды, да и технологии складирования традиционным способом уже отработаны годами. Это приводит не только к росту масштабов накопления на дневной поверхности техногенных образований, но и впоследствии может привести к глобальной экологической катастрофе.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Боков, В. Г. Богатство в отвалах (проблемы утилизации горно-промышленных отходов в России / В. Г. Боков, В. Л. Заверткин, В. Н. Лазарев // Центр. — 1994. — № 8–9. — С. 12–14.
2. Быховский, Л. З. Техногенные отходы как резерв пополнения минерально-сырьевой базы: состояние и проблемы освоения / Л. З. Быховский, Л. В. Спорыхина // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. — 2011. — № 4. — С. 15–20.
3. Горлова, О. С. Техногенные месторождения полезных ископаемых / О. С. Горлова. — Магнитогорск : МГТУ им. Н. Носова, 2001. — 77 с.
4. Горное дело: терминологический словарь / под науч. ред. акад. РАН К. Н. Трубецкого и чл.-корр. РАН Д. Р. Каплунова. — М. : Горная книга, 2016. — 635 с.
5. Казаков, В. Б. Развитие угольной промышленности в условиях создания высокопроизводительных рабочих мест, перехода на наилучшие доступные технологии и импортозамещения / В. Б. Казаков, Л. В. Калачева, И. В. Петров, И. Л. Сурат // Уголь. — 2017. — № 6 (1095). — С. 48–50.
6. Каменев, Е. А. Техногенные минерально-сырьевые ресурсы / Е. А. Каменев, Ю. А. Киперман, М. А. Комаров, В. А. Коткин, А. Б. Аширматов ; под ред. Б. К. Михайлова. — М. : Научный мир, 2012. — 236 с.
7. Макаров, В. А. Золото техногенных минеральных объектов — ресурсы и проблемы геолого-технологической оценки // Золото и технологии. — 2011. — № 3 (13). — С. 25–28.
8. О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2011 году : Государственный доклад / Центр «Минерал» ФГУНПП «Аэрогеология». — URL: http://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okrzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii/130175/ (дата обращения: 17.10.2019).
9. Петров, И. В. Эколого-экономический подход в сфере обращения с отходами производства

- в регионе / И. В. Петров, Д. Ю. Савон // Экология. Природопользование. Экономика : сб. : К 75-летию со дня рождения В. А. Харченко : Материалы междунар. конф. — МГГУ, Минэнерго РФ, МПР РФ, АГН. — 2013. — С. 43–56.
10. Селезнев, С. Г. Хозяйственно-правовые аспекты российского законодательства в области использования горнопромышленных отходов / С. Г. Селезнев // Проблемы использования отходов горнодобывающих производств : сб. материалов конф. Москва, 25–26 апреля, 2013 г.
11. Селезнев, С. Г. О проблеме использования горно-промышленных отходов / С. Г. Селезнев // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. — 2013. — № 4. — С. 41.
12. Пат. 2513816 Российская Федерация, МПК Е 21 С 41/00, Е 02 В 7/06. Способ образования техногенного месторождения / Г. Р. Буткевич, В. В. Одабаи-Фард, И. В. Петров. — Заявл. 19.11.12 ; опубл. 20.04.14, Бюл. № 11.
13. Трубецкой, К. Н. Классификация техногенных месторождений, основные категории и понятия / К. Н. Трубецкой, В. Н. Уманец, М. Б. Никитин // Горный журнал. — 1989. — № 12. — С. 6–9.
14. Умнов, В. А. Направления использования ресурсов техногенных месторождений в экономике / В. А. Умнов // Пленарные доклады Четвертого Международного форума «Россия в XXI веке: Глобальные вызовы и перспективы развития». — М., 2015. — С. 234–242.
15. Умнов, В. А. Эколого-экономическая оценка управления техногенными месторождениями / В. А. Умнов // Вестник РГГУ. — Серия «Экономика. Управление. Право». — 2017. — № 2 (8). — С. 21–29.
16. Черняховский, А. Г. О геолого-экономической и стоимостной оценке объектов твердых полезных ископаемых / А. Г. Черняховский // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. — 2013. — № 2. Экология: природные и техногенные ресурсы : учебник для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки «Горное дело» и по специальности «Экономика и управление на предприятии (горная промышленность)» направления подготовки «Менеджмент» / под редакцией А. В. Корчака, В. А. Харченко. — М., 2011. — 342 с.
17. Экономика, организация, управление природными и техногенными ресурсами : учебное пособие / В. Г. Гридин, А. Р. Калинин, А. А. Кобяков и др. ; под ред. проф. А. А. Кобякова и проф. В. А. Харченко. — М. : Горная книга, 2012. — 742 с.

ВТОРИЧНЫЕ РЕСУРСЫ, ОБРАЗУЮЩИЕСЯ В НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Маргарита Михайловна Редина

Российский университет дружбы народов,
доцент, доктор экономических наук

Александр Петрович Хаустов

Российский университет дружбы народов,
профессор, доктор геолого-минералогических наук

ВВЕДЕНИЕ

Добыча нефти сопровождается образованием широчайшего спектра отходов: это отходы производства и потребления, отходы разных категорий опасности, подлежащие рециклированию, либо абсолютно непригодные для переработки отходы, связанные с основным производством и сервисной деятельностью, и т. д.

Классификация отходов будет представлена ниже, пока же кратко определим актуальность проблемы. По данным, представленным в официальных источниках, добывающая отрасль является лидером по образованию отходов: доля отходов от добычи полезных ископаемых увеличилась с 89,2% (3334,6 млн т) в 2010 г. до 93% (5786,2 млн т) в 2017 г. Отрасль сохраняет за собой лидерство и по объемам хранения (95%) и захоронения (94%) отходов. Среди отходов собственно нефтедобывающих предприятий преобладают нефтешламы и отходы бурения. В качестве примера количественных оценок объемов образования отходов нефтедобычи приведем статистические данные крупнейших российских нефтедобывающих компаний за 2017 г. (табл. 17.1).

Таким образом, очевидно, что среди важнейших направлений сокращения объемов образования отходов нефтедобычи и (при возможности) их вторичного использования приоритетными «объектами» должны стать отходы бурения и нефтешламы. Однако обе эти группы отходов крайне разнообразны по своему исходному составу и способности трансформироваться со временем при контактах с окружающей средой, что осложняет выбор оптимальных технологий их вторичного использования.

Помимо этих наиболее массовых групп отходов нефтедобыча формирует широкий спектр отходов, которые будут более детально представлены далее.

ОБРАЗОВАНИЕ ОТХОДОВ В НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ: ИСТОЧНИКИ И КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ОЦЕНКИ

Современные нефтедобывающие предприятия представляют собой производственные комплексы, в состав которых могут входить также и непрофильные, не относящиеся непосредственно к добыче нефти объекты. В настоящем разделе нормативы образования отходов деятельности непрофильных производств (подсобные хозяйства и др.) не рассматриваются.

Судя по каталогам и нормативным документам, регламентирующим расходы материалов в современном нефтедобывающем комплексе, к настоящему времени их применяется несколько тысяч наименований и типоразмеров. Многообразие видов используемых материалов определяет, в свою очередь, разнообразие состава и свойств отходов. Методические и нормативные документы, которые регламентируют использованием материальных

ресурсов в нефтегазовом комплексе и, соответственно, образование вторичных ресурсов, их учет и обращение с ними, разрабатываются уже более 40 лет. Среди наиболее ранних документов: «Временный норматив оснащенности вышкомонтажной бригады техническими средствами», «Методика определения вторичных материальных ресурсов и их номенклатуры», «Методические рекомендации по нормированию расхода материалов на техническое обслуживание и ремонт основных фондов нефтяной промышленности», «Нормирование расхода и запасов материальных ресурсов в бурении» и др. Для установления нормативов образования отходов производства в результате деятельности непрофильных производств и нормативов образования твердых бытовых отходов (ТБО) необходимо обращаться к нормативным документам, регламентирующим деятельность соответствующих отраслей промышленности и сельского хозяйства.

Таблица 17.1. Объемы образования некоторых видов отходов в крупнейших нефтедобывающих компаниях России за 2017 г., т

	ПАО «Газпром нефть»	ПАО «НК «Роснефть»	ОАО «Сургутнефтегаз»	ПАО «ЛУКОЙЛ»	ПАО «НОВАТЭК»	ПАО «Татнефть»
Наличие отходов на начало года, всего	63 655,1	13 803 539	37 501,1	131 719	10 902	168,9
нефтешламы	7 091,1	10 228 792	4 065,9	24 034		168,9
отходы бурения	25 630,0	1 163 622				
Образовано отходов за год	1 134 004,7	6 411 553	797 344,4	1 384 460	46 942	61 696,5
нефтешламы	122 285,2	697 838	17 246,3	67 245		30 588,4
отходы бурения	884 165,9	467 5585				
Использовано (утилизировано) отходов, в том числе силами др. хозяйствующих субъектов	743 649,3	4 367 220	462 681,7	867 199	11 817	10 180,5
нефтешламы	450,5	362 324	0,000	1		332
отходы бурения	97 873,7	3 796 470				
Обезврежено отходов, в том числе силами др. хозяйствующих субъектов, всего	200 287,2	533 581	50 470,9	32 063	1255	0
нефтешламы	65 959,9	292 271	18 500,5	9433		0
отходы бурения	97 873,7	44 921				
Наличие отходов на конец года, всего		14 079 896				98,4
нефтешламы		9 993 718				0
отходы бурения		1 641 373				

Информационно-аналитическая схема (классификация) отходов, образующихся в нефтедобывающей отрасли, приведена на рис. 17.1.

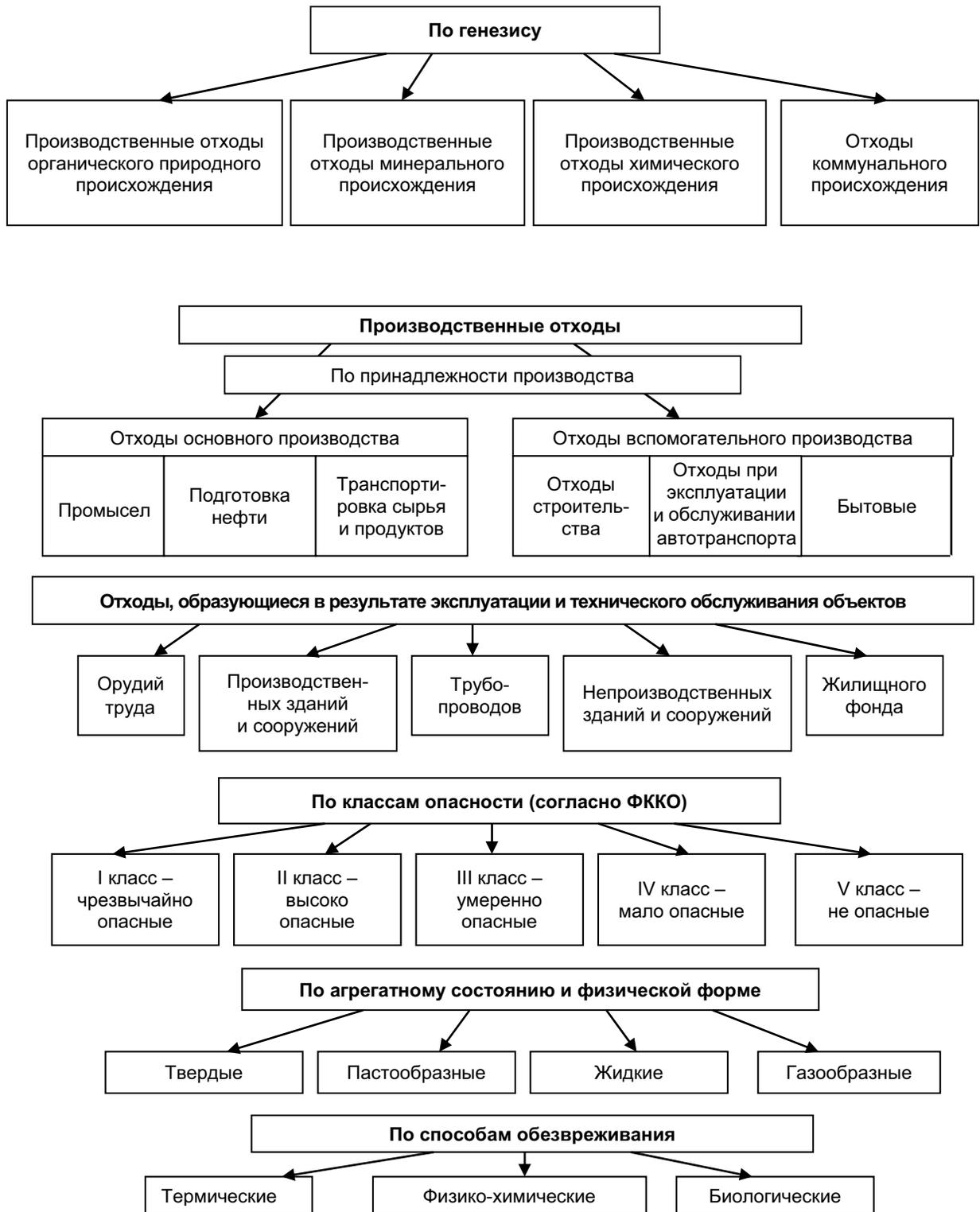


Рис. 17.1. Информационно-аналитическая схема систематизации отходов

В ИТС 28–2017 «Добыча нефти» приводится перечень отходов по объектам и стадиям добычи нефти. Весь объем отходов распределен по отдельным объектам их образования: нагнетательная или поглощающая скважины, куст скважин, трубопроводы сбора и транспорта скважинной продукции, мультифазная насосная станция, закачка пресной воды в пласт и др. В качестве примера приведем перечень отходов «Производство в целом» (табл. 17.2).

Таблица 17.2. Отходы «Производство в целом»

Наименование отхода	Источник образования отходов	Класс опасности	Наименование способа утилизации	Код по ФККО	Масса образования, тонн
Воды сточные буровые при бурении, связанном с добычей сырой нефти, малоопасные	Проведение буровых работ, ликвидация аварий на водопроводах	4	Утилизация отходов, переработка	29113001324	230–6452,495
Всплывшие нефтепродукты из нефтеловушек и аналогичных сооружений	Производственная и строительная деятельность	3	Утилизация отходов	40635001313	0,943–10,7
Грунт, отработанный при лабораторных исследованиях, содержащий остатки химических реагентов (грунт после УЗГ очищенный)	Утилизация нефтезагрязненного грунта	4	Утилизация отходов	94810101394	266,036
Грунт, загрязненный нефтью или нефтепродуктами (содержание нефти или нефтепродуктов 15% и более)	Ликвидация аварий на нефтепроводах	3	Обезвреживание отходов	93110001393	151,64
Грунт, загрязненный нефтью или нефтепродуктами (содержание нефти или нефтепродуктов менее 15%)	Ликвидация аварий на нефтепроводах	4	Обезвреживание отходов, утилизация отходов	93110003394	8,472–29 508,6
Лом и отходы стальные несортированные	Обслуживание технологического оборудования	5	Утилизация отходов	46120099205	2881,55
Лом и отходы, содержащие незагрязненные черные металлы в виде изделий, кусков, несортированные	Замена оборудования, деталей, ремонтные работы, техническое обслуживание и текущий ремонт автотранспорта, обращение с черными металлами и продукцией из них	5	Утилизация отходов	46101001205	27,872–1478,2
Лом и отходы, содержащие несортированные цветные металлы, в виде изделий, кусков с преимущественным содержанием алюминия и меди	Техническое обслуживание и текущий ремонт автотранспорта	3	Утилизация отходов	4620111203	0,015

Таблица 17.2 (продолжение)

Наименование отхода	Источник образования отходов	Класс опасности	Наименование способа утилизации	Код по ФККО	Масса образования, тонн
Отходы минеральных масел моторных		3	Утилизация отходов	40611001313	29,01
Отходы минеральных масел трансмиссионных		3	Утилизация отходов	40615001313	2,57
Мусор с защитных решеток при водозаборе	Грубая механическая очистка воды на водозаборных сооружениях при заборе воды из поверхностных источников	5	—	71011001715	0,12
Шламы буровые при бурении, связанном с добычей сырой нефти, природного газа и газового конденсата, с применением бурового раствора на углеводородной основе, умеренно опасные		3	Обезвреживание отходов	2912111393	5,75
Осадок механической очистки нефтесодержащих сточных вод, содержащий нефтепродукты в количестве 15% и более	Производственная и строительная деятельность	3	Утилизация отходов	72310201393	4,563
Остатки и огарки стальных сварочных электродов	Сварочные работы, производственные объекты, обслуживание технологического оборудования	5	Утилизация отходов	91910001205	0,106–0,154
Отходы (осадки) водоподготовки при механической очистке природных вод (шлам фильтров от водоподготовки)	Эксплуатация котельной	5	Утилизация отходов	71011002395	0,12
Отходы базальтового волокна и материалов на его основе	Использование по назначению (теплоизоляция) с утратой потребительских свойств	4	—	45711201204	0,94
Отходы добычи полезных ископаемых	Производственная деятельность	4	Утилизация отходов	20000000000	7085,9 – 24 217,087

Отходы изолированных проводов и кабелей	Электроизоляционные работы	5	Утилизация отходов	48230201525	0,03
Отходы материалов лакокрасочных на основе алкидных смол в среде негалогенированных органических растворителей	Строительно-монтажные работы	3	Утилизация отходов	41442011393	0,093
Отходы минеральных масел компрессорных	Производственная и строительная деятельность	3	Утилизация отходов	40616601313	0,065–48,73
Отходы минеральных масел индустриальных	Техническое обслуживание оборудования	3	Утилизация отходов	40613001313	0,786–38,148
Отходы песка незагрязненные	Строительно-монтажные работы	5	Утилизация отходов	81910001495	0,416
Отходы прочих видов деятельности в области добычи полезных ископаемых, включая геологоразведочные, геофизические и геохимические работы	Строительство скважин	4	—	290000000000	7085,9
Отходы резиноасбестовых изделий, незагрязненные	Использование по назначению с утратой потребительских свойств, ремонтные работы, эксплуатация оборудования	4	Обезвреживание отходов, утилизация отходов	45570000714	0,05–2,09
Отходы смесей нефтепродуктов при технических испытаниях и измерениях	Испытательная (химико-аналитическая) лаборатория	3	Обезвреживание отходов	94250101313	7
Отходы стекловолокна	Изоляция линейных объектов	5	—	34140001205	0,92
Отходы цемента в кусковой форме	Строительно-монтажные работы	5	Утилизация отходов	82210101215	0,55
Отходы эксплуатации и обслуживания оборудования для транспортирования, хранения и обработки нефти и нефтепродуктов	Производственная деятельность	3	Утилизация отходов	91100000000	90,496
Отходы электрического оборудования, содержащего ртуть	Производственная деятельность	1	Утилизация отходов	47110000000	0,002
Растворы буровые при бурении нефтяных скважин, отработанные, малоопасные	Проведение буровых работ	4	Утилизация отходов	29111001394	55,5–7776,321

Таблица 17.2 (окончание)

Наименование отхода	Источник образования отходов	Класс опасности	Наименование способа утилизации	Код по ФККО	Масса образования, тонн
Сальниковая набивка асбестографитовая промасленная (содержание масла 15% и более)	Эксплуатация и обслуживание нефтепромыслового оборудования	3	Утилизация отходов	91920201603	0,056
Сальниковая набивка асбестографитовая промасленная (содержание масла менее 15%)	Обслуживание машин и оборудования	4	—	91920202604	0,79
Стружка черных металлов несортированная, незагрязненная	Производственная и строительная деятельность	5	Утилизация отходов	36121203225	4,994
Твердые остатки от сжигания нефтесодержащих отходов	Обезвреживание (сжигание) отходов, установки термического обезвреживания отходов	4	Утилизация отходов	74721101404	0,602–1,1
Угольные фильтры отработанные, загрязненные нефтепродуктами (содержание нефтепродуктов менее 15%)	Очистные сооружения для очистки сточных вод	4	Обезвреживание отходов	44310102524	0,52
Шлак сварочный	Сварочные работы	4	Утилизация отходов	91910002204	0,06–0,23
Шлам очистки емкостей и трубопроводов от нефти и нефтепродуктов	Зачистка резервуаров, емкостей и трубопроводов, зачистка и промывка оборудования для хранения, транспортирования и обработки нефти и нефтепродуктов	3	Утилизация отходов, обезвреживание отходов	91120002393	1,591–7829,0
Шламы буровые при бурении, связанном с добычей сырой нефти, малоопасные	Бурение скважин, проведение буровых работ	4	Утилизация отходов, обезвреживание отходов	29112001394	10 395,327–60 314,38
Щебень известняковый, доломитовый некондиционный, практически неопасный	Строительно-монтажные работы	5	Утилизация отходов	23111204405	0,134

Потребности в проведении оценок образования отходов и разработке нормативов возникают уже на предынвестиционной (составление программ хозяйственной деятельности в регионе, крае, области) и предпроектной стадиях работ.

Технологический процесс в нефтедобывающей промышленности условно разбивается на несколько взаимосвязанных этапов, на которых образуются различные по объемам и разновидности отходы производства и потребления:

- этап проведения геологоразведочных работ (геофизических исследований);
- бурение поисково-разведочных гидрогеологических и инженерно-геологических скважин;
- этап испытания, строительства эксплуатационных скважин, при необходимости — бурение скважин для поддержания пластовых давлений;
- строительство нефтепромысловых объектов и инфраструктуры;
- этап эксплуатации промышленных объектов и инфраструктуры, в том числе объектов внутри- и межпромыслового трубопроводного транспорта;
- ликвидация месторождения.

Все этапы сопровождаются технологическими процессами, которые формируют определенные виды отходов, учет которых необходим при разработке проектов нормативов их образования и лимитов на размещение.

Этап проведения геологоразведочных работ сопровождается сооружением подъездных путей, развертыванием базового лагеря, сооружением вертолетной площадки, прокладки сейсмопрофилей и др. Наиболее распространенный вид отходов — порубочные остатки древесины, тара, бытовые отходы.

Этап бурения разведочно-поисковых скважин также включает сооружение подъездных магистралей, временных жилых поселков и сооружений, стоянок техники, буровых площадок, складов и площадок для хранения труб, техники и материалов. Количество отходов по сравнению с предыдущим этапом резко возрастает, а их состав изменяется от древесных остатков от раскряжевки и металллолома до бытового мусора и др.

Этап испытания, строительства эксплуатационных скважин (нефтяных, гидрогеологических и изыскательских) сопровождается монтажом и перетаскиванием буровых установок, их демонтажом, подготовительные работы по отсыпке площадок и подъездных путей, эксплуатацию бурового оборудования и инструментов, сооружение амбаров, площадок для вспомогательной техники и хранения труб, реагентов, емкостей, ремонт и обслуживание производственных фондов. Отходы формируются из технологических операций процесса бурения (буровой шлам, буровые сточные воды, отработанные буровые растворы, химические реагенты, продукты испытания скважин). Преимущественно это отходы III–IV классов опасности. В среднем при строительстве одной скважины образуется до 1000 м³ отходов бурения.

К отходам бурения также относят грунты, загрязненные нефтепродуктами, буровыми растворами, продуктами испытания скважин. В процессе эксплуатации и капитального ремонта буровой техники также образуются самые разнообразные отходы, от отработанных моторных масел и нефтешламов до упаковочных материалов и ветоши.

Этап строительства нефтепромысловых объектов и инфраструктуры включает операции по сооружению соответствующих объектов. Виды отходов при этом максимально близки к традиционным отходам строительства. Строительство внутри- и межпромысловых объектов включает возведение сооружений по сбору нефти и газа, водоводов, кабельных линий, объектов сбора и подготовки нефти и газа (ЦПС, УПН, УПГ), насосных и компрессорных станций (ДНС, КС), соответствующей предохранительной, регулирующей и запорной арматуры. Виды отходов — от металлических (остатки труб, электродов и др.) до смета мусора с территории промышленных и жилых объектов.

Этап эксплуатации промышленных объектов и инфраструктуры включает такие операции, как добыча нефти, газа, рассолов, подготовка нефти к транспортировке,

внутрипромысловый сбор нефти и газа, сооружение систем поддержания пластовых давлений, вспомогательные работы (ремонт оборудования, обслуживание специальной промысловой техники, лабораторный и метрологический контроль, ремонт зданий и сооружений). Виды отходов — от нефтешламов до осадков от канализационных сооружений, а также бытовых отходов жилых помещений.

Капитальный ремонт скважин, их консервация, перевод в другие категории, переликвидация являются неотъемлемой частью эксплуатации залежи и сопровождаются образованием таких отходов, как металлический лом, остатки цементного раствора, глинопорошков, бытового мусора и др.

Этап ликвидации месторождения включает демонтаж оборудования, в т. ч. фундаментов буровых вышек и других сооружений, очистку территории, утилизацию шламовых амбаров с последующей рекультивацией загрязненных и нарушенных земель, консервацию и ликвидацию скважин в соответствии со специальными проектами. Виды отходов: от нефтешламов, металлического лома, загрязненных грунтов и строительного мусора до бытовых отходов жилых помещений.

В справочнике ИТС 28–2017 приводятся сведения об образовании отходов на следующих объектах и стадиях деятельности нефтедобывающих предприятий:

- производство в целом;
- отходы за период жизни скважины (объемы образования отходов эксплуатации нефтяной скважины, нагнетательной или поглощающей скважины), отходы куста скважин;
- отходы трубопровода для сбора и транспортировки скважинной продукции, напорного нефтепровода;
- промышленные отходы в результате чистки оборудования: дожимной насосной станции, мультифазной насосной станции, приемо-сдаточного пункта (ПСП);
- промышленные отходы в процессе обессоливания нефтегазоводяной жидкости: комплексной подготовки нефти (УКПН), установки подготовки нефти (УПН), установки предварительного сброса пластовой воды; газокompрессорной станции (КС), установки подготовки нефтяного газа;
- отходы системы заводнения продуктивных пластов; межскважинной перекачки для закачки пластовой воды из скважин-доноров в пласты, вскрытые скважинами-акцепторами; отходы при закачке пресной воды в пласт, при закачке сточной воды в пласт; отходы технологии очистки сточных вод;
- образование отходов при бурении;
- отходы в системе переработки нефтешламов и переработки отходов, в т. ч. отходы установки сжигания отходов, резервуарного парка.

В заключение приводится алгоритм пошагового рассмотрения нескольких технологий и выбора наилучшей доступной технологии для нефтедобычи. Очевидно, эти же шаги целесообразно рекомендовать и для отбора наилучшей доступной технологии (НДТ) при обращении с отходами.

Таким образом, количественные оценки образования отходов, в том числе и рециклируемых, могут быть получены для объектов, подразделенных на следующие виды в зависимости от их целевого назначения и выполняемых функций:

- орудия труда;
- производственные здания и сооружения;
- непромышленные здания и сооружения;
- линейная часть трубопроводного транспорта (внутри- и межпромысловые трубопроводы), электрические линии, дороги и др.;
- жилищный фонд;
- другие сооружения.

Количественные характеристики объемов образования отходов при планировании и проектировании основываются на нормативах образования отходов. Методы определения

нормативов образования отходов потребления являются типовыми для всех отраслей промышленности. На выбор метода расчета нормативов оказывают влияние особенности способа потребления продукции (производственное и личное потребление), а также потребительские свойства вторичного сырья, которые отражаются в номенклатуре отходов потребления.

Для разработки нормативов образования отходов применяются следующие методы:

- *расчетно-аналитический* — применяется при наличии конструкторско-технологической документации на производство продукции, при котором образуются отходы (технологических карт, рецептур, регламентов, рабочих чертежей). Расчетно-аналитический метод применяется при определении индивидуальных нормативов образования отходов производства. Сущность метода заключается в формировании нормативов на основе расчета отдельных нормообразующих элементов. На основе документации, в соответствии с установленным составом *норм расхода сырья и материалов*, норматив образования отходов рассчитывается как разность между нормой расхода сырья, материалов на единицу продукции и чистым (полезным) их расходом с учетом неизбежных безвозвратных потерь сырья;
- *экспериментальный* — используется при трудно контролируемых технологических процессах, допускающих по рецептуре определенный диапазон изменений составных элементов сырья, а также при большой трудоемкости аналитических расчетов. На основе статистической обработки опытных замеров веса (объема) полезного продукта в единице веса (объема) отхода определяется показатель, характеризующий среднее содержание полезного продукта в отходах в процентах (C_{np}). Исходя из его значения и отчетных данных о количестве извлеченного из отхода полезного продукта (M_{np}), определяется объем образования отходов (VO);
- *статистический* — условно подразделяется на две разновидности, учитывающие специфику образования отходов производства и потребления; в случае отходов производства используется для производств, где регламенты технологических процессов не являются еще устойчивыми и нормативы образования отходов не могут быть связаны с единицей производимой продукции. Нормативы определяются на основе статистической обработки отчетной информации за определенный (базовый) период с последующей корректировкой данных в соответствии с планируемыми организационно-техническими мероприятиями, предусматривающими снижение материалоемкости продукции. Статистические данные обрабатываются за ряд лет, затем проводится корректировка удельных показателей на планируемый период в соответствии с тенденциями развития технологии и организации производства. Для изделий, находящихся в стадии освоения, так же как при определении норм расхода основного сырья, нормативы образования отходов оцениваются экспериментальным путем с определением веса отходов при производстве наиболее типичных представителей продукции с расчетами средних по данному виду продукции показателей;
- *метод маркшейдерских замеров* применяется традиционно в случае оценок образования отходов при вскрышных работах, когда прямой учет количества вскрыши не производится или он недостаточно точен. В случае оценок образования отходов нефтедобычи маркшейдерские замеры могут использоваться для определения размеров площадных объектов, где размещаются отходы либо которые потенциально могут стать источниками отходов;
- *экспертные оценки* применимы, когда нет возможности использовать ни один из перечисленных выше методов.

Выбор метода определяется условиями наличия исходной информации и спецификой технологических процессов, для которых проводятся расчеты.

На практике наибольшее распространение получил метод расчета объемов образования отходов по справочным таблицам на основе определенных заранее удельных нормативов.

Метод используется для расчета количества образования отходов в нефтегазодобывающей отрасли по основным видам деятельности предприятий и только для тех категорий отходов, на которые отсутствуют утвержденные методики расчета нормативов образования отходов, а также отходов, нормы которых трудно определить с помощью перечисленных выше методов.

Достоинство метода заключается в том, что охвачено большое количество материалов, применяемых в современном нефтедобывающем производстве, а также довольно полный спектр основных и второстепенных видов деятельности. Расчет нормативов образования отходов в результате производства основных видов продукции, а также деятельности вспомогательных производств выполняется с учетом особенностей технологического процесса, номенклатуры и количества использованного сырья, а также номенклатуры и количества конечной продукции.

Получаемые результаты позволяют для каждого конкретного предприятия, видов деятельности и существующего оборудования на основе удельных показателей расхода, взятых из справочников, создавать базу данных, включающую в себя необходимую для управления отходами информацию.

Исходя из особенностей конкретного процесса и характеристики отходов производства и потребления предприятия, а также характеристик технологического цикла, рассчитывается фактическое количество образования и накопления отходов за расчетный период.

Количественные оценки образования отходов: некоторые расчетные методы

Рассмотрим более подробно отдельные производственные процессы, связанные с добычей нефти, и подходы к определению количества отходов.

Внутрипромысловые трубопроводы

Нормирование расхода материалов в процессе эксплуатации внутрипромысловых трубопроводов осуществляется аналогично нормированию производственных зданий и сооружений. Основным видом нормируемых расходов материалов для ремонта являются стальные трубы и сварочные электроды.

Большая часть работ, связанных с ремонтом трубопроводного транспорта, относится к капитальному ремонту. Во многих случаях капитальный ремонт внутрипромыслового трубопровода сводится к практически полной замене существующих конструкций на новые. В связи с этим нормирование расхода труб при ремонте трубопроводов рекомендуется проводить на основе экспертной оценки состояния трубопровода.

Нормы расхода труб устанавливаются отдельно для нефтепроводных труб бесшовных, электросварных и большого диаметра с дальнейшей их детализацией по видам.

В зависимости от условий работы предприятий система трубопроводов разделяется по следующим структурным признакам:

- выкидные линии от нефтяных скважин до групповых или индивидуальных замерных установок (ГЗУ);
- сборные коллекторы от ГЗУ до первой ступени сепарации и товарных парков;
- трубопроводы для перекачки нефти от товарных парков до ГС УМН;
- нефтепроводы между товарными парками;
- магистральные нефтепроводы;
- водоводы системы поддержания пластового давления (ППД);
- газопроводы от первой ступени сепарации до компрессорной станции, до газоперерабатывающего завода (ГПЗ);
- газопроводы от компрессорной станции до потребителя, до ГПЗ;
- продуктопроводы от ГПЗ до товарно-сырьевых парков;
- технологические (внутрицеховые) трубопроводы.

При оценках срока службы труб и механизмов, сроков их замены и ремонтов следует также учитывать агрессивность транспортируемых сред (содержание компонентов в нефти).

Потребность в трубах для ремонта трубопроводов устанавливается по их диаметрам в соответствии с ГОСТ, определяющим типоразмеры труб.

Требующиеся объемы ремонта трубопроводов определяются в следующей последовательности.

- Определяется протяженность трубопроводов каждого вида $L_{по}$ по состоянию на начало отчетного года. Протяженность определяется суммированием всех трубопроводов по всем диаметрам:

$$L_{по} = \sum I_i, \quad (1)$$

где I_i — длина труб (отдельно бесшовных, сварных, большого диаметра) i -го диаметра отдельно по каждому виду трубопроводов.

- Исходя из состояния трубопроводов и условий их эксплуатации, определяется общая протяженность участков, требующих ремонта на начало отчетного года $L_{зо}$:

$$L_{зо} = \sum I_{из}, \quad (2)$$

где $I_{из}$ — протяженность отдельных участков (отдельно бесшовных, сварных, большого диаметра) i -го диаметра, требующих ремонта по каждому виду трубопроводов.

$L_{зо}$ определяется на основе утвержденного для предприятия (объединения) раздельного плана капитального и текущего ремонта трубопроводов. План капитального ремонта формируется с учетом специфических особенностей эксплуатации трубопроводов в конкретных природных и производственных условиях. Капитальный ремонт участков трубопроводов проводится при 3–5 прорывах в год на 1 км трубопроводов. Основанием служат акты потери герметичности и выхода из строя трубопроводов по данным за 3 последних года их эксплуатации.

Фактический норматив износа трубопровода определяется в процентах по формуле:

$$\mu = (L_{зо} / L_{по}) \cdot 100, \quad (3)$$

где μ — фактический норматив износа (отдельно по бесшовным, сварным и трубам большого диаметра) по каждому виду трубопроводов по i -му диаметру труб.

Потребность в трубах на планируемый год определяется по формуле:

$$П_{зп} = (\mu \cdot L_{пп}) / 100, \quad (4)$$

где $П_{зп}$ — потребность в трубах (отдельно по бесшовным, сварным и трубам большого диаметра) по каждому виду трубопроводов по i -му диаметру труб на планируемый год, км; $L_{пп}$ — протяженность трубопроводов каждого вида на начало планируемого года по i -му диаметру и отдельно по бесшовным, сварным и трубам большого диаметра, км.

Потребность труб $П_{зпв}$ в весовом измерении:

$$П_{зпв} = П_{зп} \cdot q, \quad (5)$$

где q — вес 1 п. м трубы i -го диаметра с соответствующей толщиной стенки и отдельно по бесшовным, сварным и трубам большого диаметра, кг/м³.

Нормативы образования отходов при ремонте и эксплуатации трубопроводов устанавливаются, исходя из потребности в проведении ремонта трубопроводов и норм безвозвратных потерь. Кроме отходов стальных труб, для ремонта трубопроводов существенную значимость имеют отходы сварочного производства, изоляционные и другие материалы — в зависимости от специфики производства. Нормирование отходов названных материалов рекомендуется производить после расчетов образования отходов по трубам соответствующих диаметров и в непосредственной увязке с объемами работ по ним.

Орудия труда

Орудия труда — активная часть основных производственных фондов, включающая в свой состав:

- рабочие машины и оборудование;
- силовые машины и оборудование;
- транспортные средства.

К рабочим машинам и оборудованию относятся оборудование общепромышленного назначения и специфичная техника.

Оборудование общепромышленного назначения — это различные металлорежущие, деревообрабатывающие, кузнечно-прессовые, литейные, сварочные, подъемно-транспортные механизмы, строительно-дорожные машины и др.

Специфичная для нефтедобывающих предприятий техника включает:

- наземное оборудование скважин (колонные трубные головки, фонтанные елки и др.);
- подземное оборудование скважин (насосно-компрессорные трубы, погружные насосы, кабели и др.);
- оборудование механизированной добычи нефти (станки-качалки, погружные насосы, гребенки и др.);
- емкостное оборудование (горизонтальные и вертикальные аппараты, сепараторы, замерные установки, емкости для хранения нефти и нефтепродуктов и др.);
- теплообменное оборудование и нагревательная аппаратура (теплообменники, печи газовые, трубчатые, индукционные, блоки нагрева, газофракционирующие колонны, путевые нагреватели и т. п.);
- насосное оборудование (трубопроводные и товарные насосы для перекачки нефти, насосы для перекачки сжиженных газов, воды и сточных вод, блочно-кустовые насосные станции);
- оборудование для капитального ремонта скважин;
- оборудование буровых установок (трубы бурильные, рабочие штанги, долота, бурильные головки, замки, рукава и др.);
- компрессорное оборудование;
- спецтехника, технологический транспорт.

Силовые машины и оборудование на эксплуатационные нужды — электрическое, теплосиловое.

К транспортным средствам общепромышленного назначения относятся: грузовые и легковые автомобили, автосамосвалы, автобусы, автоцистерны. Из состава автотранспортных средств исключается линейная часть трубопроводного транспорта, по которым нормативы образования отходов рассчитываются отдельно.

Капитальный ремонт предполагает комплексное проведение работ по всем элементам конструкций или выборочное для тех конструкций, неисправность которых влияет на сохранность его (оборудования) смежных конструкций. Используются детали и конструкции преимущественно промышленного изготовления, а изношенные элементы заменяются элементами из более прочного и долговечного материала. В этом случае заменяемые конструкции и элементы будут являться отходами, подлежащими нормированию и утилизации,

и, соответственно, будут входить в проект нормативов образования отходов и лимитов на их размещение (ПНООЛР).

К текущему ремонту относятся работы по систематическому и своевременному предохранению отдельных конструкций и деталей от преждевременного физического износа. Ремонт включает профилактические мероприятия и устранение мелких повреждений и неисправностей, возникающих в процессе эксплуатации. Как и в случае капитального ремонта, текущие ремонты должны сопровождаться расчетами нормативов отходов с их последующей утилизацией и входить в ПНООЛР.

Периодичность проведения ремонтных работ, продолжительность и состав ремонтного цикла зданий и сооружений устанавливается предприятием в соответствии со специальными нормативами в зависимости от условий эксплуатации с перечнем работ по капитальному и текущему ремонтам и перечнем конструктивных элементов, подлежащих ремонту или замене. В соответствии с данным перечнем производится определение разновидностей и объемов отходов.

Техническое обслуживание сопровождается образованием отходов, включающих отработанные масла, аккумуляторы, другие жидкости и материалы, необходимые для эксплуатации техники, обтирочные материалы, сменные элементы бурового оборудования металлоконструкции трубопроводов, привышечных сооружений, буровых укрытий и т. п.

Оценки объемов отработанных буровых шламов

Как правило, объем буровых шламов (БШ) рассчитывают, исходя из планируемых объемов буровых отходов, которые включают БШ, отработанный буровой раствор (ОБР) и буровые сточные воды (БСВ). В соответствии с РД 39-3-819-91 «Методические указания по определению объемов отработанных буровых растворов и шлама при строительстве скважин», объем шламового амбара ($V_{\text{ша}}$) определяется по формуле:

$$V_{\text{ша}} = 1,1 \cdot (V_{\text{шл}} + V_{\text{ОБР}} + V_{\text{БСВ}}). \quad (6)$$

Объем бурового шлама или выбуренной породы:

$$V_{\text{шл}} = V_{\text{скв}} \cdot 1,2, \quad (7)$$

где $V_{\text{скв}}$ — объем всей скважины, м³; 1,2 — коэффициент, учитывающий разуплотнение выбуренной породы.

Объем ОБР рассчитывается по формуле:

$$V_{\text{ОБР}} = 1,2 V_{\text{скв}} \cdot K_1 + 0,5 V_{\text{ц}}, \quad (8)$$

где K_1 — коэффициент, учитывающий потери бурового раствора, равный 1,054; $V_{\text{ц}}$ — объем циркуляционной системы буровой установки, равны 320 м³.

Объем буровых сточных вод рассчитывается по формуле:

$$V_{\text{БСВ}} = 2 V_{\text{ОБР}}. \quad (9)$$

Расчет объема скважины производится с учетом конструкции скважин и коэффициента кавернозности. Так, например, объем скважины составит при глубине 1700 м, коэффициенте кавернозности 1,3 и указанной ниже конструкции:

Название колонны	Диаметр долота, мм	Интервал спуска, м	
		от (верх)	до (низ)
Направление	508	0	30
Кондуктор	295	0	500
Эксплуатационная	216	0	1700

$$V_{\text{СКВ}} = 0,785 (0,508^2 \cdot 1,30 \cdot 30) + (0,295^2 \cdot 1,30 \cdot 470) + (0,216^2 \cdot 1,30 \cdot 1200) = \\ = 0,785 (10,5 + 47 + 60) = 0,785 + 117,5 = 92,2 \text{ м}^3.$$

Объем шлама составляет для данной скважины:

$$V_{\text{БШ}} = 1,2 \cdot 92,2 = 111 \text{ м}^3.$$

Объем ОБР для этого же случая составит:

$$V_{\text{ОБР}} = 1,2 \cdot 111 \cdot 1,054 + 0,5 \cdot 320 = 300 \text{ м}^3.$$

Объем буровых сточных вод:

$$V_{\text{БСВ}} = V_{\text{ОБР}} \cdot 2 = 300 \cdot 2 = 600 \text{ м}^3.$$

Объем шламowego амбара:

$$V_{\text{ША}} = 1,1 \cdot (111 + 3000 + 600) = 1112 \text{ м}^3.$$

При варианте с замкнутым циклом очистки сточных вод:

$$V_{\text{ША}} = 1,1 (111 + 300) = 425 \text{ м}^3.$$

В целях уменьшения объемов жидких сточных вод на площадке для бурения скважин рекомендуется сооружение отдельных амбаров: первый — для буровых сточных вод и отработанных буровых растворов, второй — для сбора очищенных и ливневых вод. При строительстве амбаров необходимо учитывать степень защищенности подземных вод, гидроизоляции месторождения относительно рельефа (поймы рек и водоохраные зоны), степень гидравлической связи с водными объектами и др.

При бурении кустовых и одиночных скважин источником загрязнения подземных вод могут стать утечки отходов бурения и буровые растворы из шламовых амбаров, емкостей и накопителей вследствие плохой изоляции. Как правило, это временные сооружения с периодом эксплуатации 0,5–1,5 г. Емкость этих сооружений составляет 500, 800 м³ и более на одну скважину.

Буровые шламы чаще всего представлены средними и тяжелыми глинами с преобладанием иловато-пылевых фракций с содержанием песка от 5 до 30%. Относительная плотность образцов изменяется от 2200 до 2700 кг/м³ и часто зависит от технологии и степени отделения шлама при очистке промывочной жидкости. Содержание нефтепродуктов в шламах продуктивных коллекторов может достигать 700 мг/кг и более.

Экспериментально установлено, что до 60% реагентов прочно сорбируется на глинах, а остальные 40% распределяются между фильтратом, буровым раствором, остающимся в циркуляции, и буровым раствором, сбрасываемым в шламовый амбар (отработанный буровой раствор).

В составе бурового шлама обычно присутствуют порода (60–80%), органическое вещество (8–10%), водорастворенные соли (6%), а также нефть, утяжелители и др. Пик загрязнения подземных вод, как правило, наблюдается при завершении бурения, когда на поверхность сливается до 250 м³ отработанного бурового раствора возле каждой скважины и его остатки из наземного хранилища. Особую опасность при этом представляют углеводороды сырых нефтей и нефтепродукты, фенолы ПАВ, полимеры и хромат-ионы, обладающие высокой миграционной способностью.

Несвоевременная обработка и утилизация отходов бурения часто приводит к тому, что вследствие больших объемов отходов бурения, а также высоких концентраций загрязняющих веществ применение существующих технологий очистки и нейтрализации становится *в принципе невозможным*. В результате значительные объемы отходов захораниваются часто без предварительной физико-химической обработки в целях нейтрализации. Такие емкости, как правило, организуются в земляных амбарах-накопителях без надежного противотрационного экрана, который препятствует миграции компонентов ОБР и БШ в зону аэрации и грунтовые воды.

Вторичные материальные ресурсы

Согласно действующей нормативной базе (ГОСТ Р 54098–2010 и др.), в качестве вторичного сырья рассматривается однородная и паспортизованная часть вторичных материальных ресурсов, образованных из собранных, накопленных и специально подготовленных для повторного хозяйственного использования отходов производства и потребления или продукции, отслужившей установленный срок или морально устаревшей. Это материал (вещество), полученный из отработанных продуктов и отходов (за исключением отходов, образующихся в первичном производственном процессе), восстановленный для использования повторно в качестве сырья для получения конечного полезного продукта.

Под вторичными ресурсами понимают материальные накопления сырья, веществ, материалов и продукции, образованные во всех видах производства и потребления, которые не могут быть использованы по прямому назначению, но потенциально пригодны для повторного использования в народном хозяйстве для получения сырья, изделий и/или энергии.

Вторичные материальные ресурсы (ВМР) — это отходы производства и потребления, образующиеся в результате хозяйственной деятельности, для которых существует возможность повторного использования в качестве товарной продукции непосредственно или после дополнительной обработки. Сюда в общем случае относят пригодные для утилизации отходы производства и потребления, образующиеся в материальном производстве, сфере услуг и в процессах конечного потребления продукции. К ВМР относят: отходы производства и потребления, которые в перспективе (потенциально) или сразу (актуально) пригодны для использования в промышленном производстве для получения сырья, изделий и (или) энергии; отходы производства и потребления, специально собранные и подготовленные к использованию в хозяйственных целях или к переработке во вторичное сырье; продукцию первичной (предварительной) переработки отходов, соответствующую требованиям определенных нормативных (ГОСТ, ГОСТ Р, СТО, ТУ) и/или технических (ТО) документов; отходы, специально складированные в техногенных ресурсных накоплениях для их использования в определенном или неопределенном (отдаленном) будущем в качестве вторичного сырья.

Вторичные топливно-энергетические ресурсы, согласно ГОСТ 31607–2012, — это топливно-энергетические ресурсы, полученные как отходы или побочные продукты (сбросы и выбросы) производственного технологического процесса.

Учитывая данные определения, в данном разделе рассмотрим вторичные материальные ресурсы нефтедобычи, которые образуются в процессе производства продукции либо потребления продукции других отраслей.

Отходы потребления

Расчет нормативов образования отходов потребления, относящихся к ВМР, проводится на основе удельных показателей:

- образование твердых коммунальных отходов (ТКО);
- количество обтирочных материалов при обслуживании техники и оборудования при эксплуатации и обслуживании автомобильного транспорта;
- другие виды переработки сырья.

В качестве нормативных документов, регламентирующих операции сбора отходов потребления в качестве вторичного сырья, существуют справочники, на основе которых выделяются следующие наименования ВМР:

- макулатура в производственном потреблении (оберточная и упаковочная бумага, бумажные мешки сухие, архивная документация, коробочная тара, картонная транспортная тара, шпули, гильзы, втулки);
- вторичные полимерные материалы (полиэтиленовая сельскохозяйственная пленка, полимерная тара, полимерные мешки из-под реагентов и др.);
- вторичные текстильные материалы (текстильные изделия);
- изношенные покрышки и автомобильные камеры (покрышки автомобильно-дорожной, строительной и другой специальной техники).

Перечисленные разновидности отходов потребления в качестве вторичного сырья являются наиболее распространенными в нефтедобывающей отрасли и подлежат сдаче в соответствующие организации.

В качестве ВМР используются отработанные нефтепродукты, подлежащие регенерации для дальнейшего использования. В первую очередь к ним относятся масла для карбюраторных и дизельных двигателей, трансмиссионные масла, гидравлические масла, промышленные, трансформаторные, кабельные, компрессорные и др., а также нефтяные промывочные жидкости, цилиндрические масла, смеси нефти и нефтепродуктов.

Указанные категории отходов нефтепродуктов имеют ориентировочные нормативы сбора в % от исходного количества потребления (по установленным нормам расхода) и обязательны для сбора.

Осадки очистных сооружений также относятся к категории ВМР. В качестве удельных показателей нормативы образования осадков разработаны для различных отраслей производств, где проводится очистка сточных вод от вредных примесей, а также водоподготовка.

Для нефтедобывающих предприятий наибольшее распространение имеют следующие категории образующихся осадков очистных сооружений:

- осадки сточных вод производственных очистных сооружений, нефтешламы, буровые сточные воды;
- осадки сточных вод на очистных сооружениях жилых поселков и промышленных площадок;
- осадки очистных сооружений (первичных отстойников и уплотненного избыточного активного ила при средней влажности 92,6%);
- осадки сточных вод влажностью 95–98% от мойки автомобилей и их деталей и др. механизмов;
- маслоотходы обводненные (80%) от мойки автомобилей и др. механизмов;
- флотомаслошлам от мойки автомобилей и их деталей и др. механизмов;
- отработанные фильтрующие материалы очистных сооружений;
- осадки от водоподготовки некондиционных вод, используемых для ППД.

В качестве ВМР рассматриваются отходы лесозаготовок, представляющие собой кусковые отходы раскряжевки, горбыль, рейки, короткомеры, опилки, стружку, прочие древесные отходы.

К ВМР относятся также отходы стекла и строительных материалов, стеклобой, стекловата, стекловолокно, стеклоткани, прочие отходы стекла, бой огнеупорных изделий и кирпича, бой бетонных и железобетонных конструкций, отходы цемента, бетона, кровельных материалов,

строительный мусор, отходы асфальтового производства. Для этих видов ВМР необходимо рассчитывать нормативы их образования и лимиты на размещение.

К этой же категории отходов относятся отходы лакокрасочных изделий (красители, лаки, краски, мастика, смолы, шпатлевки и др.).

Отходы производства

Данные виды отходов связаны непосредственно с реализацией производственных процессов и образуются на всех стадиях работ на объектах добычи нефти. Подробный перечень отходов представлен в таблицах справочника ИТС 28–2017. Выше, в табл. 17.2, представлены отходы, образующиеся в целом при добыче нефти. Также детальные перечни отходов сформированы по отдельным объектам и операциям:

- отходы «Нагнетательная или поглощающая скважины»;
- отходы «Куст скважин»;
- отходы «Трубопроводы сбора и транспорта скважинной продукции»;
- отходы «Напорный нефтепровод»;
- отходы «Дожимная насосная станция»;
- отходы «Мультифазная насосная станция»;
- отходы «Приемо-сдаточный пункт (ПСП)»;
- отходы «Комплексной подготовки нефти (УКПН)»;
- отходы «Установка подготовки нефти (УПН)»;
- отходы «Установка предварительного сброса пластовой воды»;
- отходы «Газокомпрессорная станция (ГКС)»;
- отходы «Установка подготовки нефтяного газа»;
- отходы «Система заводнения продуктивных пластов»;
- отходы «Межскважинная перекачка для закачки пластовой воды из скважин-доноров в пласты, вскрытые скважинами-акцепторами»;
- отходы «Закачка пресной воды в пласт»;
- отходы «Закачка сточной воды в пласт»;
- отходы «Технологии очистки сточных вод».

Количественные оценки образования данных отходов можно также дополнить расчетами образования отходов бурения и образования нефтешламов и объемов нефтезагрязненных грунтов в случае утечек и аварий. Подходы к определению количества этих отходов представлены в следующем разделе.

Расчет образования буровых шламов проводится по формулам (6)–(9).

Специфическим видом отходов, для которого не приведены количественные оценки в ИТС 28–2017, является сера. Отходы серы рассматриваются как перспективное сырье для ряда отраслей народного хозяйства, однако расчеты осложняются непостоянством состава нефти.

ТЕХНОГЕННЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ НАКОПЛЕННЫХ ОТХОДОВ НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Значительное количество накопленных загрязнений, обусловленных деятельностью нефтедобывающих объектов, стало причиной включения нефтезагрязненных территорий в перечень приоритетных объектов Федеральной целевой программы «Ликвидация накопленного экологического ущерба» на 2014–2025 гг. В паспорте программы отмечается: «широко распространенным проявлением накопленного экологического ущерба являются большие площади загрязнения нефтью и нефтепродуктами, возникшие в результате добычи, транспортировки углеводородного сырья, функционирования нефтехимических предприятий и размещения складов горюче-смазочных материалов. Ароматическая фракция углеводородов содержит полициклические углеводороды, в том числе бенз(а)пирен, обладающий выраженными канцерогенными и мутагенными свойствами. Являясь чрезвычайно устойчивыми к разложению

в окружающей среде, полициклические углеводороды через пищевые цепочки экосистем распространяются на значительные расстояния, накапливаясь в рыбе, животных и воде. Попадая в организм человека, данные соединения накапливаются в жировых тканях, вызывая генетические мутации и уродства у новорожденных». В связи с этим одна из основных задач федеральных целевых программ — экологическая реабилитация территорий, подверженных негативному воздействию объектов накопленного экологического ущерба с нефтесодержащими загрязнениями, и предотвращение появления таких объектов в будущем.

Для решения этой задачи предусмотрены мероприятия по разработке технологий и строительству установок для обезвреживания и утилизации нефтесодержащих отходов, разработке, совершенствованию и апробации технологий биоремедиации загрязненных земель, реализации практических мероприятий по ликвидации накопленного экологического ущерба в рамках 30 «горячих» экологических точек, оказывающих негативное воздействие на условия проживания более 4 млн чел.

Экологическая реабилитация территорий, подверженных негативному воздействию объектов накопленного экологического ущерба с нефтесодержащими загрязнениями:

- численность населения, проживающего в зоне негативного воздействия объектов накопленного экологического ущерба, экологические условия проживания которого улучшены, к 2025 г. должна составить 9 тыс. чел.;
- объем накопленных загрязнений (на объектах прошлого экологического ущерба, включенных в Программу) должен сократиться со 156,32 млн т (2012 г.) до 0.

Как уже было показано, наиболее значительные количества отходов нефтедобычи — нефтешламы и отходы бурения. К настоящему времени в районах деятельности нефтедобывающих предприятий накоплено значительное количество данных отходов. Однако, несмотря на содержание в нефтешламах определенной доли «полезного компонента», не всегда имеются возможности их переработки. По данным автономной некоммерческой организации «Международный центр содействия предприятиям по переработке нефтешламов», более 3 млн га пахотных земель выведено из оборота в результате экологических нарушений, допущенных предприятиями ТЭК. В прудах-отстойниках, нефтяных амбарах, технологических картах находится огромный объем нефтешламов. С момента добычи сырья до непосредственного использования нефтепродуктов они подвергаются более чем 20 перевалкам, при этом 75% потерь происходит от испарений и 25% — от аварий и утечек, что становится причиной загрязнения грунтов — формирования весьма распространенного вида отходов. Последствия аварий зачастую недооцениваются по разным причинам: это и сложности определения количества разлитой нефти и сопутствующих компонентов, и проблемы выявления отдаленных эффектов загрязнения, и наличие вторичных загрязнений и нарушений в природе из-за неквалифицированных действий при ликвидации разлива.

Оценки количества нефтезагрязненных грунтов при утечках и аварийных разливах

Оценки количества загрязненных грунтов (как одного из видов отходов) осложняются разнообразием условий формирования.

Характеристики шламов определяются тем, какой состав имели исходные нефтепродукты, в какие условия окружающей среды они попали и какое провели время в контакте с атмосферным воздухом, осадками, грунтом (рис. 17.2). Не случайно при ликвидации аварийных разливов и рекультивации территорий значительное внимание уделяют «возрасту» загрязнения. Дело в том, что нефти и нефтепродуктам свойственно изменять свой состав и свойства с течением времени. В дополнение к этому при контакте с атмосферным воздухом и осадками меняется и количество шламов. Так, благодаря длительному хранению нефтешламов на одном из нефтеперерабатывающем заводе (НПЗ) их объем возрос примерно на треть. Это связано с процессами уплотнения при ликвидации и хранении и разуплотнения при извлечении шлама из хранилища.

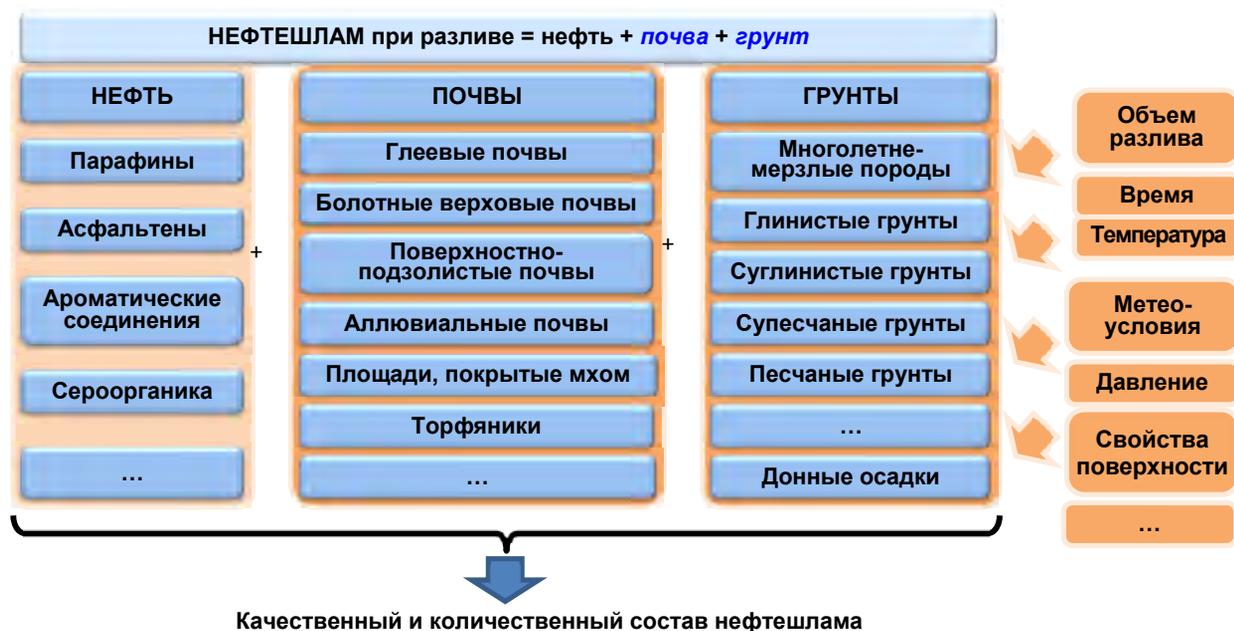


Рис. 17.2. Условия формирования состава и видов нефтешламов

Остановимся более подробно на данных особенностях формирования нефтяного загрязнения. Оценка объемов загрязненных нефтепродуктами (НП) почвогрунтов, как того требуют нормативные документы, проводится с учетом скорости распространения НП. Она зависит от плотности нефтепродукта, его вязкости, вязкости воды и водопроницаемости слоя, площади растекания НП по поверхности грунтовых слоев.

Масса НП, адсорбированная грунтовым слоем, рассчитывается, исходя из мощности слоя грунта, его пористости в месте разлива, капиллярной влагоемкости слоя грунта (объем пор, занятых капиллярной водой), коэффициента поверхностного натяжения НП и аналогичного параметра для воды.

Особый интерес представляет взаимодействие различных по вязкости нефтей с типами грунтов, различающимися по проницаемости. Так, в работе рассчитаны риски в денежном исчислении при аварии нефтепровода на местности со среднепересеченным рельефом в зависимости от кинематической вязкости для трех типов грунта.

Различия скоростных параметров движения нефти в зависимости от ее вязкости весьма ощутимы. Особенно велики риски распространения маловязких нефтей в первые часы аварий для песков и супесей. Для песков в начале пролива происходит интенсивное вертикальное насыщение с дальнейшей пропиткой нефтью, независимо от ее вязкости. Затем наступает некоторая стабилизация вертикального просачивания, и далее, в зависимости от увеличения вязкости, контролируемой охлаждением нефти, происходит замедление ее горизонтального и вертикального просачивания. Для суглинков и глин процессы снижения проницаемости близки к экспоненциальному характеру и имеют значительные различия лишь в параметрах. Недочет вышеуказанных факторов (проницаемость грунта и вязкость нефти) может привести к существенным ошибкам в оценках объемов распространения НП и возможности прогнозных оценок просачивания на глубину до зоны насыщения.

В научной литературе существуют различные оценки объемов образования нефтешламов, которые во многом противоречивы. Так, в качестве примера приведем следующий расчет. Плотность нефти (ρ_n) — 820 кг/м^3 ; вязкость нефти (μ_n) — $20 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}\cdot\text{с}$; коэффициент поверхностного натяжения НП (σ_n) — $2,6 \cdot 10^{-2} \text{ кг/с}^2$; площадь разлитой нефти — 10 м^2 ; масса разлитой нефти — 1000 кг . В результате расчетов по вышеприведенным формулам получены следующие объемы образования шламов для различных типов почв (табл. 17.3).

Таблица 17.3. Объемы образования нефтешламов в различных типах почв

Почвы	Скорость проникновения нефтепродуктов, м/с	Максимальная глубина проникновения нефтепродуктов, м	Площадь распространения разлива в почвенных горизонтах, суммарно, м ²	Масса загрязненных грунтов, кг
Аллювиальные	0,004–0,030	0,4	100	3450
Подзолистые	0,001–0,026	0,32	230	9216
Глеевые	0,001–0,021	0,26	180	2134
Болотные	0,004–0,102	0,23	280	5443

Резюмируя, можно сделать следующие выводы:

- наибольшие объемы нефтешламов формируются в подзолистых почвах, что связано с их высокой проницаемостью и сорбционной емкостью;
- аллювиальные почвы интенсивно пропускают нефтяные загрязнения вследствие высокой вертикальной проницаемости;
- *поверхностно-подзолистые* и *аллювиальные* почвы более устойчивы к нефтяному загрязнению, т. к. их свойства способствуют самоочищению и выносу НП из почвенного профиля;
- *глеевые* и *болотные* почвы обладают специфическими механическими и физико-химическими свойствами, определяющими их неустойчивость к загрязнению НП, которые аккумулируются в верхних горизонтах и очень медленно разлагаются.

Полученные результаты свидетельствуют о существенной дифференцированности почвенного покрова по условиям трансформации антропогенными факторами, что делает необходимым учет свойств почвогрунтов при оценках образования шламов в условиях аварий.

Приведенные выше данные позволяют отнести рассматриваемые нами нефтешламы к категории *с высоким содержанием твердых примесей*. Это утверждение можно в полной мере отнести к песчаным грунтам, слабо сорбирующим нефть (всего 5–10%).

Содержание НП в образующихся нефтешламах (грязных или замазученных грунтах) чаще контролируется их пористостью или механической структурой почвогрунтов и характеризуется коэффициентом нефтеемкости, который изменяется от 0,01 до 0,50 в зависимости от разновидности грунтов (табл. 17.4).

Таблица 17.4. Нефтеемкость грунтов, доли ед.

Грунт	Влажность				
	0%	20%	40%	60%	80%
Гравий (диаметр частиц 2–20 мм)	0,30	0,24	0,18	0,12	0,06
Пески (диаметр частиц 0,05–2 мм)	0,30	0,24	0,12	0,06	0,06
Кварцевый песок	0,25	0,20	0,15	0,10	0,05
Супесь, суглинок (средний и тяжелый)	0,35	0,28	0,21	0,14	0,07
Суглинок легкий	0,47	0,38	0,28	0,18	0,10
Глинистый грунт	0,20	0,16	0,12	0,08	0,04
Торфяной грунт	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10

Данная таблица свидетельствует о том, что нефтеемкость всех разновидностей грунтов находится в обратной зависимости от их влажности. По данным Института биологии КФ АН РАН, через год после загрязнения содержание остаточной нефти на экспериментальных площадках составляло: в зоне средней тайги — 40,7–44,4%, в южной тайге — 12,5%, в лесостепи — 4,4% (суходольный луг) и 1,64% (влажный луг), в сухих субтропиках — 0,47%.

Разнообразие компонентов, входящих в состав шлама, условий среды, в которой он формируется, а также его продолжительное «время жизни» приводят к весьма широким пределам вариаций состава и свойств шламов. Поэтому необходимо применять различные подходы к ликвидации загрязнений, рекультивации нарушенных территорий и мониторингу состояния не только непосредственно загрязненных участков почв и грунтов, но и контактирующих с ними частей природных комплексов.

Использование шламов как ВМР

Использование нефтешламов как ВМР требует решения нескольких проблем. Прежде всего, остановимся на том, каким образом можно оценить уровень угрозы нефтяных шламов для природных систем и человека. Традиционно для выявления класса опасности отходов используется отработанная схема. Однако здесь сразу же возникает проблема: в отличие от многих других видов отходов, нефтяные шламы характеризуются весьма значительным разнообразием состава. По сути, нефтешламом можно считать любую смесь нефтепродуктов и нефти с грунтом или с любыми другими твердыми или жидкими веществами. Чаще всего этим термином обозначают многокомпонентные физико-химические системы (смеси), состоящие из воды, нефтепродуктов и минеральных добавок (глина, окислы металлов, песок и т. д.). При этом и сами нефтепродукты могут быть в различной степени вредными для окружающей среды (содержать вещества от 1-го до 4-го классов опасности), а «разбавляющие» их твердые частицы весьма неоднородны и разнообразны.

Если в случае шламов, образующихся при производстве нефтепродуктов или их хранении, можно условно говорить о некотором постоянстве (не однообразии!) состава, то шламы, появляющиеся при аварийных разливах, характеризуются намного большими вариациями свойств. С точки зрения охраны окружающей среды, большую тревогу вызывает именно последняя, «непредсказуемая» категория. Важность данной проблемы объясняется тем, что количество таких шламов составляет ежегодно десятки тысяч тонн.

Тем не менее некоторую среднюю картину состава нефтешлама, образовавшегося при аварийном разливе, все-таки можно сформировать: в него входят частицы грунта и смесь нефтепродуктов (прежде всего нафтены и парафины, а также комплекс ароматических соединений). Детальный анализ последней группы соединений позволяет выявить присутствие множества весьма опасных загрязнителей, включая полиароматические. Нефть содержит ощутимые количества соединений, являющихся стойкими органическими загрязнителями. Часть из них относятся к первому и второму классам опасности и обладают ярко выраженным канцерогенным и тератогенным действием. Несмотря на весьма разнообразный исходный состав нефти и многообразие факторов, приводящих к ее деградации в окружающей среде (рис. 17.2), в среднем в составе нефтяного шлама присутствует около 0,3% бенз(а)пирена, производные перилена (0,5%) и пирена (0,9%), фенантрены (0,3%), хризены (0,3%). Трансформация углеводородов приводит к появлению устойчивых битуминозных гетероатомных соединений, в том числе высокого класса опасности. Это оксихиноны полициклических ароматических углеводородов, галогенированные ароматические и алифатические углеводородов, фталаты. Требуется учет их содержания в почвах и почвенных вытяжках, а также в грунтовых водах после проведения рекультивационных работ. Отметим, что мониторинг должен продолжаться в течение довольно длительного времени. Так, в ходе эксперимента было установлено, что даже спустя 76 месяцев после загрязнения нефтью в почвах присутствовали продукты деградации нефти.

Согласно федеральному классификационному каталогу отходов и дополнению к нему, шламы нефти и нефтепродуктов (получаемые на нефтеотделительных установках, от очистки танков нефтеналивных судов, трубопроводов, емкостей и т. д.) отнесены к 3-му классу опасности. Но очевидно, что при детальном учете вредных компонентов (полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), тяжелые металлы) класс опасности может быть повышен. Это затрудняет как использование нефтешламов для получения полезного продукта (по

мнению многих авторитетных специалистов, это практически невозможно либо экономически нецелесообразно), так и утилизацию с минимальным ущербом для окружающей среды.

Важнейшим показателем токсичности нефтешламов является содержание тяжелых металлов (табл. 17.5). В данной таблице показано изменение содержания опасных компонентов по мере прохождения технологических циклов переработки нефти: от относительно невысокого в исходной нефти до максимальных значений в замазученном грунте. Концентрации тяжелых металлов в почве указывают на то, что они могут связываться в токсичные органоминеральные формы и достаточно долго находиться в виде комплексных соединений с большой долей вероятности их перехода в водную среду, почвенные растворы, микроорганизмы и растительность. Недаром угнетенные формы растительности (вплоть до полной замены растительных сообществ) наблюдаются в течение длительного времени после проведения рекультивационных работ.

Таблица 17.5. Сведения о химическом составе некоторых шламов НПЗ

Показатель	Шлам нефтяного резервуара	Шлам прямогонного мазута	Шлам очистных сооружений	Замазученный грунт
Влажность, %	16,8	11,3	35,6	12,4
Механические примеси, %	1,4	4,6	33,8	72,1
Нефтепродукты, мг/кг	725	772,9	320,3	100
Pb, мг/кг	8,5	179,2	141	189
Mn, мг/кг	62	449	473	416
Cr, мг/кг	7,06	132,5	113,5	311
Fe, мг/кг	4489	6310	56145	8719
Al, мг/кг	1532	6682	4594	6119
Cu, мг/кг	12,0	682	485	4477
Остаток после кислотного растворения, %	3,6	13,0	13,5	8,1

Присутствие нефти сказывается практически на всех показателях растений: всхожести семян, энергии, дружности и скорости прорастания, а также по морфологическим параметрам и массе 1 тыс. зерен (табл. 17.6). Так, при концентрации нефти в почве на уровне 6 и 8% в лабораторных условиях не проросло ни одного семени. У растений, выращенных на нефтезагрязненных почвах, обнаружены изменения в линейных размерах корней и надземной части. Например, если в контроле длина надземной части пшеницы в возрасте 20 суток составляла 26,05 см, то в варианте с концентрацией нефти 2% от веса почвы она была лишь 15,91 см.

Таблица 17.6. Рост и развитие яровой пшеницы (фаза кущения) на темно-серой лесной почве, загрязненной нефтью

Варианты опыта (концентрация нефти, %)	Показатели			
	Высота растений, см	Количество листьев, шт	Количество придаточных корней, шт.	Средняя длина придаточных корней, см
Контроль 0 1	16,9 ± 0,34	4,13 ± 0,06	3,10 ± 0,04	3,04 ± 0,08
3%	11,0 ± 0,76	2,45 ± 0,05	1,90 ± 0,12	1,74 ± 0,16
6%	10,2 ± 0,65	2,40 ± 0,07	1,48 ± 0,06	2,74 ± 0,13
10%	10,4 ± 0,98	2,55 ± 0,09	2,10 ± 0,015	2,40 ± 0,28

При 3-процентном загрязнении почвы продуктивность пшеницы снизилась на 85%. Аналогичные результаты были получены и в опытах с другими растениями: ячменем и гречихой.

Кроме того, нефтяное загрязнение подавляло развитие листовой поверхности и резко ухудшало водоудерживающую способность листьев яровой пшеницы (при концентрации нефти 2% она составила 92% от контроля, а при 4% снизилась до 6%).

О характере токсического действия компонентов нефтешламов и, в частности, ПАУ можно судить по многочисленным данным об угнетении растительности в присутствии данного класса соединений. Традиционно опыты проводятся с внесением бенз(а)пирена как наиболее токсичного представителя ПАУ. Исследования свидетельствуют о накоплении его в различных частях растительных и животных организмов. А при поступлении на следующие уровни пищевых цепей (от растений — травоядным животным, от них — хищникам) концентрации ПАУ увеличиваются весьма серьезно, что и требует анализа их содержания в «первоисточнике» — почвах и воде, куда они поступают, в частности, при нефтяных загрязнениях.

В табл. 17.7 приведены данные о концентрациях бенз(а)пирена в различных видах растительности. Превышение фоновых значений, в отличие от контрольных, наблюдалось при загрязнении почвы нефтью в концентрации 1%. Содержание бенз(а)пирена в растениях пшеницы, ячменя, ржи, гречихи было выше в 2,5–3 раза, а у базилика, бархатцев, зверобоя — в 3,5–4 раза. Хотя эти значения (за исключением зверобоя) не превышали региональный фоновый уровень для растений (50 нг/г), они превосходили данный показатель для почвы.

Таблица 17.7. Содержание бенз(а)пирена в растениях, выращенных на нефтезагрязненных почвах, нг/г

Концентрация нефти, %	Пшеница	Ячмень	Рожь	Гречиха	Базилик	Бархатцы	Зверобой
0	13,2 ± 3,0	16,4 ± 0,8	21,1 ± 1,0	18,5 ± 0,9	10,5 ± 0,5	12,3 ± 3,0	15,6 ± 0,7
1	40,1 ± 2,0	42,1 ± 2,0	44,0 ± 2,0	38,1 ± 1,9	45,0 ± 2,5	49,1 ± 2,5	58,5 ± 2,5
2	62,1 ± 3,0	65,0 ± 3,1	68,2 ± 3,3	70,0 ± 3,5	105,0 ± 5,0	110,0 ± 5,0	124,0 ± 6,0
6	197,0 ± 9,0	295,0 ± 12,0	210,0 ± 10,0	220,0 ± 10,0	270,0 ± 10,0	270,0 ± 10,0	340,0 ± 17,0

Примечательно, что накопление бенз(а)пирена у растений (пшеница, ячмень, рожь, гречиха), изначально выращенных на нефтезагрязненной почве, идет более медленными темпами, чем у тех (базилик, зверобой, бархатцы), которые оказались в условиях «нефтяного стресса» на 30-е сутки роста. Также загрязнение почвы приводило к нарушению целостности хромосом в соматических клетках исследуемых растений, в частности, нарушения сводились к появлению в хромосомах разрывов с образованием фрагментов. В результате у растений, выращенных на нефтезагрязненных почвах, сокращается число делящихся клеток (следовательно, замедляется рост).

Специальные исследования (В. С. Петросян), проведенные на объекте мирового наследия — озере Байкал, в качестве приоритетных экотоксикантов выявили высокую активность накопления ПАУ в трофических (пищевых) цепях — от донных отложений до высокоорганизованных видов (нерпы). Если для донных отложений концентрация ПАУ составляла 181 нг/г, то в тканях нерп она увеличилась до 1762 нг/г. В целом же ПАУ характеризуются высочайшими коэффициентами биоаккумуляции в тканях животных: их концентрации увеличиваются по сравнению с содержанием в воде или почвах на три порядка. Весьма значительные объемы аккумуляции нефтяных углеводородов (ПАУ и др. классов) в пищевых цепях (более чем тысячекратные превышения концентраций в живых организмах по сравнению с содержаниями в водной среде) показаны также в специальном исследовании, посвященном поведению нефти в морской среде.

ПОТЕНЦИАЛ ОТХОДОВ НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КАЧЕСТВЕ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ

Возвращаясь к спектру отходов нефтедобычи, отметим, что не все они подлежат рециклированию. Однако часть отходов может подвергаться обработке с получением полезного продукта (рис. 17.3). В ряде случаев для этого могут применяться также отходы других отраслей экономики. Безусловно, такие технологии более привлекательны.

Как показано на рис. 17.3, отходы нефтедобычи могут рассматриваться как вторичные материальные ресурсы или как вторичные энергетические ресурсы (ВЭР). В первом случае предполагается возможность рециклирования лома металлов, буровых сточных вод, нефтешламов (включая в том числе извлечение нефти из замазученных грунтов). Во втором случае отходы нефтедобычи могут использоваться в качестве вторичных энергетических ресурсов: это нефтесодержащие отходы, которые могут сжигаться с получением энергии, а также отдельные компоненты твердых коммунальных отходов, которые образуются на предприятиях нефтедобычи.

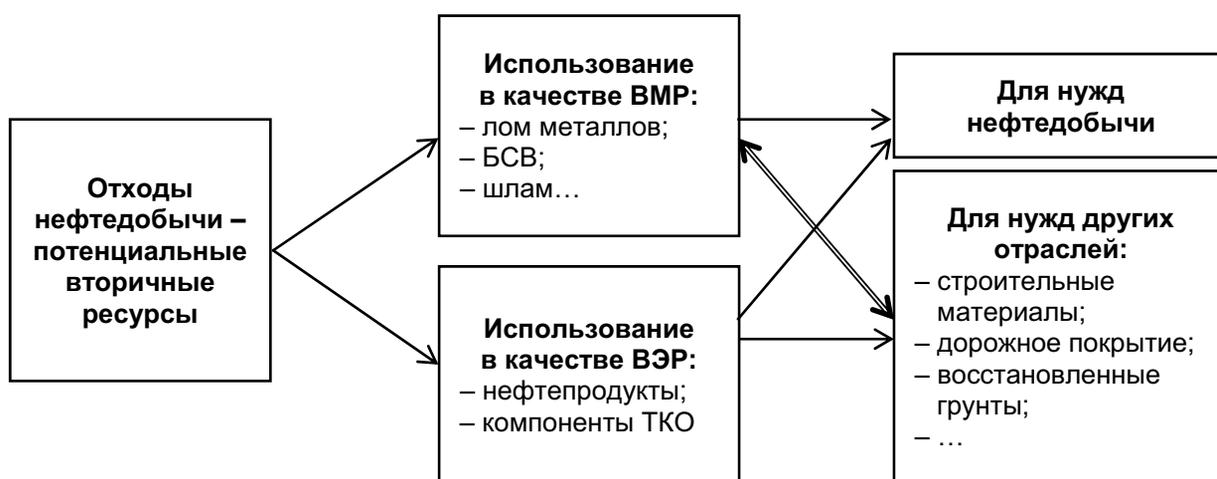


Рис. 17.3. Отходы нефтедобычи как ВМР

Учитывая, что основную массу отходов нефтедобычи, которые могут рассматриваться как ВМР, составляют нефтесодержащие отходы, далее будут рассмотрены именно технологии утилизации таких отходов с учетом возможностей получения полезного выхода — материалов или энергии.

Утилизация нефтешламов

Существующие технологии позволяют в ряде случаев проводить достаточно полную утилизацию нефтешламов. Однако разработанные на сегодня методы ориентированы прежде всего на переработку отходов, хранящихся в шламовых амбарах и отстойниках, а не на обращение с замазученными грунтами (рис. 17.4). Получаемые нефтепродукты должны иметь достаточное качество, обеспечивающее возможность их дальнейшего использования. Сложности применения таких технологий обусловлены непостоянством состава нефтепродуктов, которые присутствуют в шламах. В частности, эти нефтепродукты уже находятся в течение достаточно длительного времени в условиях окружающей среды, что приводит к серьезной «перестройке» их состава по сравнению с тем, что был характерен для нефти.

Конверсионные технологии утилизации нефтешламов предполагают получение товарной продукции при переработке отходов на промышленном оборудовании, аналогичном традиционным процессам переработки нефтесодержащих компонентов из исходного сырья. Среди предлагаемых на сегодня методов — плазменная биотехнология, использование электрогидравлического эффекта Юткина и др.



Рис. 17.4. Методы утилизации нефтешламов

Утилизационные технологии представляют собой технологии, изначально ориентированные непосредственно на вторичные ресурсы.

Классифицировать технологии переработки нефтешламов можно также с точки зрения «сохранения» самих нефтепродуктов в шламах в процессе переработки:

- *деструктивные* технологии предполагают разрушение углеводородов: сжигание, включение шламов в цемент при его производстве влажным путем, аэробная обработка;
- *недеструктивные* технологии заключаются в использовании шламов без разложения: открытая контролируемая выгрузка, захоронение с тщательным обезвоживанием, контролируемое внесение в качестве удобрений и др.

Несмотря на кажущееся многообразие, практически ни один из данных методов не дает стопроцентного результата с точки зрения экологической безопасности конечного продукта переработки, поскольку в любом случае имеется вероятность вторичных загрязнений и при сжигании отходов (образование диоксинов), и при контролируемом размещении на почвах (испарение, в том числе с выделением токсичных компонентов, таких как, например, ПАУ), и при других способах утилизации. Это приводит к необходимости комбинирования технологий (см. рис. 17.5).

Химические технологии утилизации нефтешламов предполагают применение методов экстракции, использование деэмульгаторов, окисление, нефттрализацию и прочие методы активного воздействия реагентов на нефтесодержащие отходы (шламы).

В случае физических технологий применяются физико-химические (фильтрование, центрифугирование, сепарирование, отстаивание) и термические (сжигание, пиролиз, сушка, термодесорбция) технологии, а также их комбинация.

Биологические методы предполагают биоразложение углеводородов нефти.

В любом случае перечисленные технологии приводят к удалению нефтепродуктов (углеводородов) из загрязненных сред и по сути являются технологиями не извлечения полезного компонента, а технологиями деструкции загрязнения.



Рис. 17.5. Технологии утилизации нефтешламов

Отходы извлечения серы

Особую категорию отходов составляет извлеченная сера. В настоящее время в качестве наиболее перспективных рассматриваются следующие области использования нефтяной серы:

- строительная сфера (связующие компоненты строительных смесей и гидрофобизаторы);
- сельское и лесное хозяйство (акарициды и фунгициды);
- нефтяная промышленность (противоизносные и противозадирные присадки к маслам);
- химическая область (герметики, добавки к полимерным композитам, эмульсолы и др.).

Кроме перечисленных направлений использования сера может применяться для производства кормов и удобрений, асфальтобетонов, растворителей, красящих пигментов, лекарств, фунгицидов, клеев, спичек, целлофанов, красок, автомобильных шин, а также резинотехнических и синтетических изделий и моющих средств.

ПЕРЕРАБОТКА ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ В НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ С УЧЕТОМ МЕЖОТРАСЛЕВЫХ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ

Отходы нефтедобычи как ВМР и ВЭР для отраслей экономики

Рассмотренные группы отходов нефтедобычи могут быть использованы в зависимости от потребностей отраслей-потребителей (см. рис. 17.3) с получением:

- вторичных металлов;
- нефтепродуктов;
- строительных материалов и др.

При этом технологии переработки отходов металлов не являются специфическими. Наибольшая специфика характерна для процессов использования в качестве ВМР отходов производства — нефтешламов и отходов бурения. В ряде случаев для этого применяются отходы других отраслей, в частности сельского хозяйства.

Нефтешламы

Накопленные и вновь образуемые массы нефтешламов нуждаются в переработке. Цельным продуктом при этом являются нефтепродукты, если это позволяют качества отходов, а технология характеризуется достаточной экономической и экологической эффективностью. В целом разработанные на сегодня технологии позволяют применять нефтешламы в следующих отраслях экономики (рис. 17.6). Отметим, что данные методы и направления использования ВМР нефтедобычи распространены в разной степени.



Рис. 17.6. Направления использования нефтешламов и их распространенность

Однако, несмотря на имеющиеся наработки, некоторые предлагаемые направления использования шламов как вторичных ресурсов вызывают сомнения. Так, по мнению большинства специалистов, получение товарных нефтепродуктов из нефтешламов, которые образовались при аварийном разливе или в ходе технологических процессов на НПЗ, практически нерентабельно. Это связано и с дороговизной их производства, и с весьма невысоким качеством. Отметим, что сжигание шламов считается экологически грязным видом их утилизации. В частности, речь идет о значительных выбросах углеводородов и продуктов их сгорания (включая особо токсичные соединения, например, ПАУ).

Что касается сельскохозяйственного направления использования нефтешламов, то здесь большие опасения вызывают некоторые компоненты, присутствующие в нефти в весьма «скромных» количествах, однако достаточные для перехода и аккумуляции в растениях. Это уже упомянутые выше ПАУ, тяжелые металлы и ряд других соединений. Таким образом, применение нефтешламов в качестве удобрений, что предлагается в последнее время некоторыми авторами, вряд ли может активно внедряться в практику, поскольку именно указанные вещества приводят не просто к нарушению развития растительности, но и к гибели живых организмов. Многочисленные публикации свидетельствуют о том, что по мере повышения концентрации нефтепродуктов в почвах возрастает их токсическое действие. Результатом этого становится как минимум замедление роста растений. Опасность заключается в способности данных соединений накапливаться в растительных и животных организмах.

Пожалуй, наиболее перспективным можно признать создание с использованием шламов строительных материалов и компонентов дорожных покрытий. Однако и здесь существует необходимость тщательного контроля изменения свойств получаемой продукции под действием факторов окружающей среды. Так, немецкими специалистами получены результаты, представленные в табл. 17.8. Эмиссии из используемых обычно в этой стране видов битума содержат полициклические ароматические соединения, в том числе с атомами серы.

Таблица 17.8. Содержание и эмиссии (при 180°С) вредных веществ в различных видах битума по результатам лабораторных измерений на пробах массой 100 г

Вид битума	Содержание, мг/кг		Общие эмиссии, мг/ч	Эмиссии	
	ПАУ	Бенз(а)пирен		ПАУ, мкг/ч	Бенз(а)пирен, мкг/ч
НВ 90/100	29,95	1,20	6,63	26,32	0,08
В45	29,78	2,08	13,04	22,66	0,09
В65*	26,65	1,71	2,20	3,70	0,04
В80	25,57	1,41	3,49	6,64	0,01
В200	32,13	1,78	7,00	4,13	0,03
В85/25	52,22	1,68	25,10	52,90	0,18
В95/35	93,53	2,74	37,15	78,96	0,26

* Для марки В65 количество испытаний было незначительным, в связи с чем приводимые данные следует считать предварительными.

Несмотря на то, что при температурах ниже 80°С эмиссии из битумов практически отсутствуют, а при 150°С не превышают 1 мкг/ч, определенные опасности существуют. Так, при температурах около 180°С эмиссии обнаруживаются (см. табл. 17.5), а при 250°С (например, температура укладки литого асфальта) констатируется увеличение их масштабов.

Это же касается и кровельных материалов. При их использовании в нормальных условиях вероятность превышения концентраций вредных веществ чрезвычайно мала, но это не означает, что незначительные количества выделяющихся соединений абсолютно безвредны. Эмиссии возможны при повышении температуры: для битумосодержащих материалов это от 80°С (например, на темных кровлях в летний период). Кроме того, выделения из кровельных материалов возрастают при горении, что требует дополнительных мер пожарной безопасности.

Таким образом, несмотря на весьма пристальное внимание к проблеме утилизации нефтешламов и многочисленные попытки их использования как вторичных ресурсов, в каждом конкретном случае необходимо крайне ответственно подходить к выбору соответствующих технологий.

СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ

Определение показателей для сравнения

Эффективность технологий переработки ВМР определяется комплексом экономических, технологических, экологических показателей.

При оценках внимание следует уделять всему жизненному циклу ВМР: источникам и исходным характеристикам ВМР, стадии переработки, целевому назначению и условиям применения продуктов переработки ВМР. В качестве примера приведем характеристики, которые могут быть рекомендованы для оценок (табл. 17.9).

Приведенный перечень показателей можно рассматривать как обобщенный, предварительный. В случае оценок и сравнения конкретных технологий к данному перечню следует добавить также социальные характеристики (включая создание рабочих мест и социально-экологические аспекты, связанные с оздоровлением экологической ситуации в регионах).

Также при оценках следует учитывать показатели, используемые в государственных проектах и программах. В частности, это характеристики, приведенные в Федеральной целевой программе «Ликвидация накопленного экологического ущерба» на 2014–2025 гг., и релевантных документах.

Таблица 17.9. Примеры показателей для оценки эффективности технологий переработки вторичных ресурсов в нефтедобывающей отрасли

Вид ВМР	Технологические показатели	Экономические показатели	Экологические показатели
Нефтешламы	Полнота извлечения полезного продукта. Характеристики качества полезного продукта. Объем извлекаемого полезного продукта. Соответствие продукта извлечения ВМР требованиям к его качеству (строительные материалы, грунты, нефтепродукты...)	Затраты на сбор и транспортировку нефтешламов к месту переработки. Затраты на получение полезного продукта. Цена полезного продукта. Снижение платежей за негативное воздействие	Процент утилизации отходов. Объем выбросов при термической утилизации. Характеристики опасности отходов после получения ВМР. Характеристики токсичности выбросов и сбросов при получении ВМР. Характеристики токсичности выбросов, сбросов, отходов при использовании отходов как ВЭР
Отработанные буровые растворы	Полнота извлечения компонентов для вторичного использования. Чистота компонентов	Затраты на извлечение полезного компонента. Снижение платежей за негативное воздействие	Процент утилизации отходов
Загрязненные грунты		Затраты на рекультивацию нефтезагрязненных грунтов. Снижение платежей за негативное воздействие	Процент утилизации отходов. Экологические характеристики применяемых реагентов. Площади восстановленных земель
Лом металлов		Затраты на сбор, транспортировку, сортировку и собственную переработку отхода с получением металла. Снижение платежей за негативное воздействие	Процент утилизации отходов. Объемы и характеристики опасности (токсичность) выбросов, сбросов, образующихся отходов для процессов переработки
Прочие		Затраты на сбор, транспортировку, сортировку и переработку отхода. Снижение платежей за негативное воздействие	Снижение количества отходов. Объемы и характеристики опасности (токсичность) выбросов, сбросов, образующихся отходов для процессов переработки

Непосредственно при выборе НДТ критериями достижения целей охраны окружающей среды для определения НДТ являются:

- а) наименьший уровень негативного воздействия на окружающую среду в расчете на единицу времени или объем производимой продукции (товара), выполняемой работы, оказываемой услуги либо другие предусмотренные международными договорами Российской Федерации показатели;
- б) экономическая эффективность ее внедрения и эксплуатации;
- в) применение ресурсо- и энергосберегающих методов;
- г) период ее внедрения;
- д) промышленное внедрение этой технологии на двух и более объектах, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду.

Учитывая количественный состав отходов нефтедобычи, наиболее серьезного внимания заслуживают нефтесодержащие отходы. Рассмотрим возможности сопоставления данных технологий на основе представленных критериев.

Сравнительный анализ технологий переработки нефтесодержащих отходов

Технологии переработки нефтешламов

Рассматриваются две сходные технологии переработки нефтесодержащих отходов, аналогичные представленным в патентах: патент РФ 0002536897 и патент РФ № 81445. Обе технологии предполагают получение полезного продукта с применением сходных методов обработки шламов, однако имеются различия.

Технология 1. Способ переработки нефтесодержащих отходов (буровых растворов, нефтяных шламов различного происхождения и др.), аналогичный представленному в описании к патенту РФ 0002536897: нефтесодержащие отходы обогреваются, затем разделяются с помощью центрифугирования на воду, нефть и механические примеси. Перед центрифугированием нефтесодержащие отходы сепарируются с помощью гидроциклонных установок песко- и илоотделения; водонефтяная эмульсия, полученная в результате разделения отходов на центрифуге, разрушается деэмульгаторами при температуре 60–70°С и подвергается разделению с помощью гравитационно-динамического сепаратора на нефтяную фракцию и техническую воду. Затем нефтяная фракция используется как товарная продукция, а техническая вода используется для поддержания пластового давления при добыче нефти либо повторно используется при переработке нефтесодержащих отходов. Механические примеси после разделения на центрифуге и обработки поверхностно-активными веществами направляются через илоотделитель на осушающие сетки вибросит, после чего реализуются как товарная продукция в качестве строительного материала.

Технология 2. Способ переработки нефтесодержащих отходов (буровых растворов, нефтяных шламов различного происхождения и др.), аналогичный представленному в описании к патенту РФ № 81445. Исходные буровые нефтешламы из сборной емкости направляют в обогреваемый реактор с мешалкой, в который при включенной мешалке из блока подают химические реагенты, далее обработанные нефтешламы направляют в трехфазную центрифугу, затем нефтяную и водную фазы собирают в разные сборники, твердую фазу — осадок — после этого выгружают в контейнеры, а из контейнеров осадок выгружают в прокалочную печь, прокаленный осадок через разгрузочный узел выгружают либо в сборники, либо непосредственно в смеситель, после этого в смеситель загружают также оксид кальция («пушонка») и силикат натрия, композиционную смесь затем направляют из смесителя в установку для гранулирования, потом получаемую товарную продукцию отгружают на склад готовой продукции.

В табл. 17.10 показаны ориентировочные результаты сравнения двух технологий утилизации нефтесодержащих отходов с получением строительных материалов в качестве полезной продукции. Символом отмечены идентичные оценки.

В данном случае при сопоставлении методов утилизации нефтесодержащих отходов по *технологическим критериям* обе они могут рассматриваться как равноценные: полезный продукт извлекается максимально полно; достигается оптимальное качество продукта.

Сопоставление по *экономическим критериям* показывает предположительно более высокие затраты в связи с необходимостью дополнительных энергозатрат на прокаливание твердой фазы, выходящей из трехфазной центрифуги (содержание в ней нефтепродуктов около 3–5%). Это влечет за собой удорожание полезного продукта. Снижение платежей за негативное воздействие, связанное с образованием отходов, происходит. Однако выбросы загрязняющих веществ при прокаливании должны быть оценены дополнительно, а платежи за этот вид негативного воздействия можно будет оценить после расчета объемов и состава

выбросов. Цена полезного продукта, согласно условиям технологии 2, может оказаться выше с учетом дополнительных затрат на энергию и, вероятно, более высоких платежей за негативное воздействие при эксплуатации прокалочной печи.

Таблица 17.10. Сравнение технологий утилизации нефтесодержащих отходов

Технологии	Технологические показатели	Экономические показатели	Экологические показатели
Технология 1	Полнота извлечения полезного продукта <input checked="" type="checkbox"/> Характеристики качества полезного продукта <input checked="" type="checkbox"/> Объем извлекаемого полезного продукта <input checked="" type="checkbox"/> Соответствие продукта извлечения ВМР требованиям к его качеству (строительные материалы, грунты, нефтепродукты...) <input checked="" type="checkbox"/>	Затраты на сбор и транспортировку нефтешламов к месту переработки <input checked="" type="checkbox"/> Затраты на получение полезного продукта. Цена полезного продукта Снижение платежей за негативное воздействие	Процент утилизации отходов — полная утилизация <input checked="" type="checkbox"/> Объем выбросов при термической утилизации. Характеристики опасности отходов после получения ВМР. Характеристики токсичности выбросов и сбросов при получении ВМР. Характеристики токсичности выбросов, сбросов, отходов при использовании отходов как ВЭР
Технология 2	Полнота извлечения полезного продукта <input checked="" type="checkbox"/> Характеристики качества полезного продукта <input checked="" type="checkbox"/> Объем извлекаемого полезного продукта <input checked="" type="checkbox"/> Соответствие продукта извлечения ВМР требованиям к его качеству (строительные материалы, грунты, нефтепродукты...) <input checked="" type="checkbox"/>	Затраты на сбор и транспортировку нефтешламов к месту переработки <input checked="" type="checkbox"/> Затраты на получение полезного продукта — необходимы дополнительные затраты энергии на прокаливание твердой фазы, выходящей из трехфазной центрифуги и содержащей 3–5% нефтепродуктов. Цена полезного продукта. Снижение платежей за негативное воздействие	Процент утилизации отходов — полная утилизация <input checked="" type="checkbox"/> Объем выбросов при термической утилизации — выше. Характеристики опасности отходов после получения ВМР — при выгорании нефтепродуктов в прокалочной печи образуются опасные отходы, негативно воздействующие на окружающую среду. Характеристики токсичности выбросов и сбросов при получении ВМР — предположительно менее удовлетворительны

Экологические показатели технологии 2 предположительно также уступают технологии 1 в связи с дополнительным количеством отходов при использовании прокалочной печи и дополнительным количеством выбросов при прокаливании.

Таким образом, технология 1 является предположительно более эффективной. Безусловно, для окончательного принятия решений необходимо привлечение дополнительных данных и более детальные экономические оценки, а также анализ экологических характеристик получаемой продукции для обеих технологий при обработке отходов сходного состава.

Технологии получения топлива для котельных

Технологии предполагают производство топлива на основе отходов нескольких отраслей. Это позволяет в результате решить проблему утилизации отходов не только в нефтедобыче, но и в сельском хозяйстве и угольной промышленности.

Технология 1. Состав топлива — аналогично представленному в патенте RU 2553998 С1: производится топливо для котельной, состоящее из углеродсодержащих соединений органического и минерального происхождения. В его состав в качестве углеродсодержащего соединения органического происхождения входит смесь нефтешлама и карбоксилата натрия (отход производства растительных масел) в соотношении 1 : (1–3), а в качестве углеродсодержащего соединения минерального происхождения — угольная пыль. Соотношение компонентов: смесь нефтешлама с карбоксилатом натрия — 40–50%; угольная пыль — остальное.

Технология 2. Состав топлива — аналогично представленному в патенте РФ № 2500792, С10 L 1/04, 2013 г.). Топливо содержит тяжелую нефтяную фракцию и стабилизатор, в качестве которого используют карбоксилат натрия, при следующем соотношении компонентов, % масс.: карбоксилат натрия 20–30, тяжелая нефтяная фракция — остальное.

Результаты сопоставления двух технологий представлены в табл. 17.11.

Таблица 17.11. Результаты сопоставления технологий получения топлива для котельных на основе нефтесодержащих отходов

Технологии	Технологические показатели	Экономические показатели	Экологические показатели
Технология 1	Полнота извлечения полезного продукта <input checked="" type="checkbox"/> Характеристики качества полезного продукта <input checked="" type="checkbox"/> Объем извлекаемого полезного продукта <input checked="" type="checkbox"/> Соответствие продукта извлечения ВМР требованиям к его качеству (строительные материалы, грунты, нефтепродукты...) <input checked="" type="checkbox"/>	Затраты на сбор и транспортировку нефтешламов к месту переработки <input checked="" type="checkbox"/> Затраты на получение полезного продукта <input checked="" type="checkbox"/> Цена полезного продукта. Снижение платежей за негативное воздействие	Процент утилизации отходов — полная утилизация <input checked="" type="checkbox"/> Объем выбросов при термической утилизации. Характеристики опасности отходов после получения ВМР. Характеристики токсичности выбросов и сбросов при получении ВМР. Характеристики токсичности выбросов, сбросов, отходов при использовании отходов как ВЭР
Технология 2	Полнота извлечения полезного продукта <input checked="" type="checkbox"/> Характеристики качества полезного продукта <input checked="" type="checkbox"/> Объем извлекаемого полезного продукта <input checked="" type="checkbox"/> Соответствие продукта извлечения ВМР требованиям к его качеству (строительные материалы, грунты, нефтепродукты...) <input checked="" type="checkbox"/> Низкая стабильность, высокое содержание серы и высокая зольность	Затраты на сбор и транспортировку нефтешламов к месту переработки <input checked="" type="checkbox"/> Затраты на получение полезного продукта <input checked="" type="checkbox"/> Цена полезного продукта <input checked="" type="checkbox"/> Снижение платежей за негативное воздействие — в связи с высокой зольностью и содержанием серы платежи за загрязнение атмосферы выше	Процент утилизации отходов — полная утилизация <input checked="" type="checkbox"/> Объем выбросов при термической утилизации — выше. Характеристики опасности отходов после получения ВМР — образование дополнительных отходов в связи с более высокой зольностью отходов. Характеристики токсичности выбросов и сбросов при получении ВМР — предположительно менее удовлетворительны

Таким образом, технология 1 получения топлива для котельных оказывается более предпочтительной по всему набору параметров:

- по технологическим: в связи с более высокой стабильностью;
- по экономическим: при очевидно близких затратах на получение полезного продукта (исходное «сырье» — отходы различных отраслей) предполагаются более высокие платежи за негативное воздействие на окружающую среду при использовании менее экологичного топлива (технология 2 — высокая зольность и повышенное содержание серы);
- по экологическим: дополнительные выбросы при сжигании топлива по технологии 2 в связи с повышенным содержанием серы и зольностью.

ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ В НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Проведенный анализ подходов к использованию отходов нефтедобычи в качестве вторичных ресурсов показывает, что существующие технологии позволяют значительно сократить объемы неиспользуемых отходов. В первую очередь это касается рециклируемых видов ВМР: лома металлов, отдельных компонентов ТКО, однако основная масса отходов, которые могут подвергаться вторичному использованию, — нефтесодержащие отходы, прежде всего нефтешламы.

Анализ отечественных и зарубежных патентных баз показал появление за последние 20 лет значительного количества разработок технологий утилизации нефтешламов с получением полезных продуктов. Основные направления разработки таких технологий включают:

- *использование отходов как ВЭР*: разработки посвящены созданию технологий сжигания нефтесодержащих отходов с получением максимального выхода энергии при соблюдении жестких экологических требований к эмиссиям загрязняющих веществ в процессе горения;
- *разработка новых более экологичных материалов из шламов* связана в основном с созданием строительных материалов, которые могут впоследствии использоваться для дорожного строительства; важным моментом также являются, помимо удовлетворительных качеств собственно строительного материала, его экологические характеристики;
- *повышение качества извлекаемых полезных компонентов ВМР* (нефтепродукты) — направление утилизации нефтесодержащих отходов, которое акцентируется на максимально полном извлечении нефтепродуктов из них, причем получаемые продукты должны иметь «товарное» качество, быть пригодными для использования в отраслях экономики наравне с продукцией, которая производится из исходного сырья (добываемой нефти);
- *совершенствование технологий очистки загрязненных грунтов* ориентировано прежде всего на восстановление загрязненных грунтов; получение товарной продукции в виде извлеченных нефтепродуктов в данном случае не является основной целью; весьма перспективны здесь методы биологической рекультивации с использованием бактериальных препаратов, приемов фиторемедиации и др.; достигается довольно полная степень очистки грунтов, которые впоследствии могут использоваться по своему исходному назначению в связи с достижением требуемых показателей качества (уровней загрязнения грунтов ниже допустимых пределов);
- *снижение объемов образования отходов в целом* — одно из основных направлений современного менеджмента отходов. Снижение объемов нефтяных загрязнений может достигаться прежде всего за счет четкого планирования операций по обращению с нефтью и нефтепродуктами, контроля качества проведения технологических операций, а также тщательной подготовки мероприятий по предупреждению и ликвидации аварийных разливов нефти.

Помимо перечисленных технологий важным моментом является необходимость ликвидации накопленных экологических ущербов, связанных с деятельностью предприятий нефтедобычи. Учитывая объемы накопленных нефтесодержащих отходов и длительность их хранения, в ряде случаев необходима «адаптация» перечисленных выше технологий для переработки «исторических» загрязнений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Барахнина, В. Б.* Использование нефтешлама в качестве вторичного материально-сырьевого ресурса / В. Б. Барахнина // Экологический вестник России. — 2011. — № 9. — С. 16–21.
2. Временный норматив оснащенности вышкомонтажной бригады техническими средствами. — М. : ВНИИОЭНГ, 1981. — 361 с.
3. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 году». — М. : МПР, 2018. — 298 с.
4. ГОСТ 31607–2012. Энергосбережение. Нормативно-методическое обеспечение. Основные положения. — М., 2012. — 12 с.
5. ГОСТ Р 54098–2010. Ресурсосбережение. Вторичные материальные ресурсы. Термины и определения. — М., 2010. — 24 с.
6. Инструкция по охране окружающей среды при строительстве скважин на суше на месторождениях углеводородов поликомпонентного состава, в том числе сероводородсодержащих. РД 51-1–96. — Минтопэнерго ; Минприроды РФ, 1996.
7. ИТС 28–2017. Добыча нефти / Росстандарт. — М. : Бюро НДТ, 2017. — 281 с.
8. Методика определения вторичных материальных ресурсов и их номенклатуры. — М., 1984. — 65 с.
9. Методические рекомендации по нормированию расхода материалов на техническое обслуживание и ремонт основных фондов нефтяной промышленности. — М. : ВНИИОЭНГ, 1989. — 62 с.
10. Методические указания по разработке нормативов образования отходов и лимитов на их размещение. — М. : МПР РФ, 2002. — 64 с.
11. *Немировская, И. А.* Нефть в океане. Загрязнение и природные потоки / И. А. Немировская. — М. : Научный мир, 2013. — 432 с.
12. Нормирование расхода и запасов материальных ресурсов в бурении. — М. : Недра, 1979. — 183 с.
13. Приказ Федеральной службы по надзору в сфере природопользования от 22.05.2017 г. № 242 «Об утверждении Федерального классификационного каталога отходов» (с изменениями и дополнениями) // Гарант.ру : информационно-правовой портал. — URL: <http://base.garant.ru/71695086/> (дата обращения: 24.10.2019 г.).
14. Паспорт Федеральной целевой программы «Ликвидация накопленного экологического ущерба» на 2014–2025 годы [электронный ресурс]. — URL: <http://biotech2030.ru/wp-content/uploads/ФЦП-Ликвидация-накопленного-экологического-ущерба-на-2014-2025.pdf> (дата обращения: 15.05.2019). — Загл. с экрана.
15. Пат. 2500792 Российская Федерация, МПК С10 L 1/04, С10 L 1/10, С10 L 1/18, С10 L 1/22, С10 L 10/00. Котельное топливо / Е. Р. Шпербер, Д. Р. Шпербер, Т. Н. Боковикова, Р. Е. Шпербер, Б. Е. Шпербер, Л. И. Дун, М. И. Дун. — Заявл. 16.11.12 ; опубл. 10.12.13, Бюл. № 34.
16. Пат. 2536897 Российская Федерация, МПК В09 В 3/00. Способ переработки нефтесодержащих отходов / Г. Новахов, Б. Б. Бобович. — Заявл. 19.06.13 ; опубл. 27.12.14, Бюл. № 36.
17. Пат. 2553998 Российская Федерация, МПК С10 L 1/18, С10 L 1/10, С10 L 1/04, С10 L 10/00. Топливо для котельной ТОКОШ / Р. Е. Шпербер, Д. Р. Шпербер, Е. Р. Шпербер, Б. Е. Шпербер, И. В. Дун, И. Р. Дун, Л. И. Дун, М. И. Дун, С. И. Дун. — Оpubл. 20.06.2015.
18. Пат. 81445 Российская Федерация, МПК В03 В 9/06. Технологический передел для утилизации буровых нефтешламов / Ю. П. Кудрявский, М. В. Зальберман, Б. Е. Шенфельд. — Оpubл. 20.03.09.
19. *Пуликовский, К. Б.* Повышение безопасности транспортировки нефти на основе управления риском : автореф. дисс. ... канд. тех. наук / К. Б. Пуликовский. — Уфа : ГУП «Институт проблем транспорта энергоресурсов», 2007. — 27 с.
20. РД 39-3-819–91. Методические указания по определению объемов отработанных бурильных растворов и шламов при строительстве скважин / Миннефтепром. — 15 с. — URL: <https://pdf.standartgost.ru/catalog/Data2/1/4293828/4293828789.pdf> (дата обращения: 24.10.2019).
21. РДС 82-202–96. Правила разработки и применения нормативов трудноустранимых потерь и отходов материалов в строительстве / Госстрой России. — М., 2001. — 28 с.
22. *Редина, М. М.* Экологическая безопасность в нефтегазовом комплексе / М. М. Редина, А. П. Хаустов. — М. : РУДН, 2016. — 191 с.
23. *Салахова, Г. М.* Изменения эколого-физиологических параметров растений и ризосферной микробиоты в условиях нефтяного загрязнения и рекультивации почвы : автореф. дисс. ... канд. биол. наук / Г. М. Салахова. — Уфа, 2007. — 24 с.

24. Сборник типовых норм потерь материальных ресурсов в строительстве (дополнение к РДС 82–202–96) / Госстрой России. — М., 1998. — 49 с.
25. Сборник удельных показателей образования отходов производства и потребления. — М., 1999. — 65 с.
26. Справочные материалы по удельным показателям образования важнейших видов отходов производства и потребления. — М., 1996. — 57 с.
27. Тригубова, Е. А. Технологические решения по снижению и нейтрализации вредного воздействия отходов бурения на окружающую среду / Е. А. Тригубова, А. В. Бородай. — М. : ООО «ИРЦ Газпром», 2002. — 59 с.
28. Хаустов, А. П. Охрана окружающей среды при добыче нефти / А. П. Хаустов, М. М. Редина. — М. : Дело, 2006. — 544 с.
29. Хаустов, А. П. Чрезвычайные ситуации и экологическая безопасность в нефтегазовом комплексе / А. П. Хаустов, М. М. Редина. — М. : Изд-во ГЕОС, 2009. — 456 с.
30. Хаустов, А. П. Экологические проблемы количественной оценки аварийности нефтепроводного транспорта / А. П. Хаустов, М. М. Редина, И. Н. Кунаев // Технологии нефти и газа. — 2011. — № 5. — С. 58–64.
31. Хаустов, А. П. Экологические проблемы оценки образования нефтешламов при авариях / А. П. Хаустов, М. М. Редина // Экологический вестник России. — 2011. — № 7. — С. 24–30; № 8. — С. 34–39.
32. Шпербер, Е. Р. Некоторые виды отходов нефтеперерабатывающих заводов и их классификация / Е. Р. Шпербер // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. — 2011. — № 2. — С. 27–33.
33. Sachstandsbericht des Gespraechskreis BITUMEN / Hrsg. R. Ruehl, U. Musanke. — Maerz, 2001.

ВТОРИЧНЫЕ РЕСУРСЫ, ОБРАЗУЮЩИЕСЯ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Екатерина Петровна Волюнкина

Сибирский государственный индустриальный университет,
зав. кафедрой техногенных и вторичных ресурсов, доктор технических наук

ВВЕДЕНИЕ

Одним из путей снижения материалоемкости продукции и экономии сырьевых ресурсов является вовлечение в производство вторичных материальных ресурсов (ВМР) — отходов, которые образуются как в сфере материального производства, так и в сфере потребления.

Принцип переработки вторичных ресурсов сформулировал академик И. П. Бардин: «Отходы одних технологических переделов или производств должны служить сырьем для других». Решение этой задачи является актуальным не только для России, но и для всего мирового сообщества.

Мировой и отечественный опыт показывает, что использование многих видов ВМР технически осуществимо и экономически выгодно. Восстановление сырьевых ресурсов из отходов в индустриально развитых странах мира является вопросом государственной важности, что позволило решить экономические и технологические проблемы, связанные с переработкой отходов. Повышенное внимание к использованию ВМР объясняется, с одной стороны, истощением запасов полезных ископаемых, а с другой — прямой экономической выгодой от использования дополнительных сырьевых источников.

Для российской металлургии проблема отходов имеет особую актуальность вследствие высокого уровня их удельного образования на единицу металлопродукции — в 1,5–3 раза выше, чем в развитых странах. Это обуславливает высокую ресурсо- и энергоемкость отечественных металлургических предприятий и загрязнение окружающей среды в регионах их размещения. С другой стороны, развитие черной металлургии во второй половине XX в. показало, что металлургические предприятия обладают широкими возможностями по переработке различных видов производимых человечеством отходов: от автомобильного металлолома до бытовых отходов.

Общепризнано, что техногенное минеральное сырье — это конкурентоспособный, перспективный, постоянно пополняемый минеральный ресурс. Широкое вовлечение в переработку вторичных ресурсов металлургической промышленности обеспечит экономию материально-технических ресурсов, развитие отходоперерабатывающей отрасли и снижение загрязнения окружающей среды.

ОБРАЗОВАНИЕ ОТХОДОВ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Металлургия является одной из наиболее материалоемких и энергоемких отраслей промышленности. Высокий расход материальных и энергетических ресурсов обуславливает высокий уровень образования отходов в металлургической отрасли. Это, в первую очередь, отходы обогащения рудного сырья, углей и флюсовых материалов. Другим источником образования отходов являются непосредственно технологические процессы производства кокса и агломерата, выплавки чугуна и стали, производства проката.

Известно, что на отечественных металлургических предприятиях для производства 1 т стали в технологический процесс вовлекается примерно 10 т природных ресурсов, включая воду и воздух. Оставшиеся 9 т превращаются в загрязнения в виде газов, загрязненных сточных вод и твердых отходов. По экспертным оценкам, удельный выход отходов на 1 т проката в целом по черной металлургии России составляет: породы от добычи и обогащения полезных ископаемых — 1500–2500 кг, шлаки — 500–1000 кг, шламы — 80–120 кг, сухая пыль — 80–120 кг, окалина — 30–40 кг, сточные воды — 250–300 м³, технологические газы — 8000–10000 м³, аспирационный воздух — 30–50 тыс. м³, горючие газы — 2000–2500 м³.

При обогащении железорудного сырья образуются такие отходы, как порода, шламы, хвосты сухой магнитной сепарации (5–12% от переработанной руды), хвосты мокрой магнитной сепарации (35–80% от переработанной руды). Их ежегодное образование на горно-обогатительных комбинатах России превышает 100 млн т.

При последующей переработке железорудного сырья образуется большое количество железосодержащих отходов в виде пылей и шламов газоочистных сооружений агломерационных фабрик, доменных и сталеплавильных производств, выход которых составляет около 1% от массы сырья или 7–8% конечного объема производства металлургических заводов. Содержание железа в твердых отходах агломерационного, доменного и сталеплавильного производства составляет 33–70% в пересчете на приведенное, а из 1 млн т вторичных железосодержащих отходов может быть получено 450 тыс. т металла. Кроме того, в них отмечается большое содержание оксидов цинка (до 20%), свинца и щелочных металлов.

В табл. 18.1 приведена классификация твердых отходов по производственным циклам металлургического производства.

Таблица 18.1. Классификация отходов черной металлургии по производственным циклам

Производственный цикл	Основные технологические операции	Тип отходов
Обогащение железных руд	Сухое обогащение, дробление, сортировка, гравитационная и магнитная сепарация	Порода обогащения, пыли и шламы дробильно-сортировочных и обогатительных фабрик
	Мокрое обогащение, измельчение, гравитационная и магнитная сепарация, флотация	Хвосты обогатительных фабрик, пыли и шламы дробильных фабрик
Производство агломерата	Дробление, сортировка, спекание шихты	Пыли и шламы дробильно-сортировочных фабрик, пыли и шламы очистки отходящих газов от агломашин
Выплавка чугуна	Отсев мелочи из агломерата и кокса, подача шихты в доменную печь, выплавка чугуна, слив шлака, разливание чугуна	Отсев кокса и агломерата, пыли и шламы подбункерных помещений (шихтоподачи), пыли и шламы от очистки технологического газа, шлак, пыль литейного двора, отходы огнеупоров
Выплавка стали	Заливка чугуна, подготовка металлолома, выплавка стали, выпуск шлака и стали	Пыль отделения перелива чугуна и подготовительных отделений, шлак, пыли и шламы от очистки технологических газов, отходы огнеупоров
Производство проката	Очистка сточных вод производства проката, зачистка изделий с использованием огневых и механических методов	Прокатная окалина (первичная и вторичная — замасленная), пыли и шламы от зачистки изделий

При самых совершенных технологиях предотвратить возникновение отходов невозможно. Однако высокий уровень их образования является следствием неэффективного использования в производственной деятельности природных ресурсов. Образование отходов приводит к потере материалов и энергии, а также к дополнительным экономическим издержкам в связи со сбором, транспортированием, переработкой и захоронением.

Опыт развитых государств показал, что человечество может успешно развиваться, значительно сократив потребление природных ресурсов на единицу продукции. Известно, что ресурсоемкость единицы ВВП в России в 2–3 раза выше, чем в развитых странах. Это означает, что для производства 1 т продукции в России вовлекается в 2–3 раза больше природных ресурсов при соответствующем увеличении образования отходов. В 2015 г. черная металлургия в России образовала в целом 535 млн т твердых отходов, включая добычу, обогащение и переработку железных руд, что при производстве стали в России 70,7 млн т в год составило около 8 т/т стали, то есть в 8 раз превысило выпуск основной продукции.

Выход доменного шлака на большинстве российских металлургических предприятий превышает 300 кг/т чугуна и колеблется от 368 до 472,6 кг/т чугуна, выход колошниковой пыли достигает 39–49 кг/т чугуна, доменного шлама — 30–39 кг/т чугуна, вынос пыли из конвертеров — 25–28 кг/т стали, выход конвертерного шлака — 180–190 кг/т стали, количество прокатной окалины — 50–70 кг/т металлопроката.

Зарубежный опыт показывает, что в металлургии имеются значительные резервы снижения образования отходов. В результате реализации программ, направленных на снижение материальных и энергетических потерь, за последние 20 лет практически на всех заводах черной металлургии ЕС и Северной Америки объем твердых отходов уменьшился на 80%. По данным Международного института черной металлургии, среднемировой выход доменного шлака снизился с 1984 к 1995 г. с 311 до 270 кг/т жидкого чугуна, выносимой из доменных печей пыли — с 16,9 до 10–12 кг/т чугуна (в том числе колошниковой пыли — до 7–8, доменного шлама — до 3–4 кг/т чугуна), выход конвертерного шлака составил в 1995 г. 121 кг/т стали, конвертерной пыли — 13–18 кг/т стали, количество прокатной окалины — 30 кг/т проката. Благодаря улучшению качества доменной шихты в Германии выход доменного шлака снизился с 700 кг/т чугуна (1950 г.) до 255 кг/т (1993 г.), выход сталеплавильных шлаков сократился со 180 кг/т жидкой стали (1971 г.) до 90 кг/т (1991 г.). Свидетельством эффективности осуществляемой в Германии политики ресурсосбережения является значительное сокращение выбросов пылевидных отходов в атмосферу — с 1,86 млн т (1990 г.) до 0,26 млн т (1999 г.), то есть более чем в 7 раз. В среднем удельное образование твердых отходов на единицу продукции на металлургических предприятиях развитых стран в настоящее время в 1,5–3 раза ниже, чем в России, а выбросы пылевидных отходов в атмосферу — в 8 раз. Утилизация твердых отходов на предприятиях полного металлургического цикла в Германии достигла 95–99%, в Швеции — 93%, в Японии — 97–99%. В последние годы зарубежные металлургические предприятия взяли курс на 100%-ное обратное использование образующихся отходов.

Вследствие неэффективного использования материально-сырьевых и топливно-энергетических ресурсов их доля в себестоимости продукции российских металлургических предприятий существенно превышает уровень развитых стран, составляя 66,6–73,1%, в то время как в США она равна 60,1%, Германии — 60,9%, Японии — 53,8%, Франции — 61,7%. В условиях постоянного роста стоимости сырья и энергии снижение их удельных расходов на единицу произведенной продукции является одной из важнейших проблем, стоящих в настоящее время перед российской металлургией.

ТЕХНОГЕННЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ НАКОПЛЕННЫХ ОТХОДОВ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Если образующиеся в настоящее время на промышленных предприятиях отходы производства в каком-то количестве подвергаются утилизации, то отходы, образовавшиеся до 1993 г., остаются лежать на поверхности, формируя техногенные массивы. Общее количество

накопленных отходов в целом по России оценивается в 80–100 млрд т. Metallургия наряду с угольной промышленностью лидирует по количеству накопленных отходов.

Несмотря на наличие технологических возможностей по переработке значительной части образующихся отходов в собственном производстве и увеличение в последние годы на российских металлургических предприятиях доли перерабатываемых отходов до 80–90%, все еще велико и с каждым годом растет количество отходов, размещаемых в отвалах, шламонакопителях, хвостохранилищах. Текущие тенденции образования отходов в условиях экономического развития российских металлургических предприятий обуславливают дальнейшее обострение и без того непростой экологической ситуации в регионах их размещения.

Накопления отходов металлургической и связанной с ней горнодобывающей отрасли на территории Урала и Кузбасса превышают 50 млрд т, а общая площадь занятых под их складирование и нарушенных вследствие этого экосистем составляет более 60 тыс. га. В Центрально-Черноземном районе основными объектами накопления техногенных отходов черной металлургии являются бассейн КМА, отвалы и шламонакопители Ново-Липецкого металлургического комбината (НЛМК) и ОАО «Северсталь».

На территории мест размещения отходов формируются новые месторождения полезных ископаемых — техногенные. Огромные накопленные запасы отходов и истощение природных ресурсов делают крайне актуальной проблему их разработки. Заскладированные в отвалах отходы могут служить сырьем для предприятий различных отраслей, способствуя сокращению потребления природных ресурсов. За время существования ОАО «Северсталь» на его собственной и прилегающих к нему территориях сформировалось новое антропогенное образование, сравнимое по мощности с крупным месторождением полиметаллического сырья, которое содержит более 200 тыс. т цветных и редких металлов, около 18 тыс. т мышьяка и до 3,5 тыс. т фтора. По ориентировочным расчетам, на территориях Магнитогорского, Новолипецкого, Нижнетагильского металлургических комбинатов существуют техногенные месторождения объемом более 1 млн т цветных и редких металлов каждое.

Таким образом, в объектах размещения отходов промышленности сосредоточены колоссальные объемы выведенных из хозяйственного оборота различных видов сырья, сконцентрированного на сравнительно небольших и более доступных для разработки площадях по сравнению с природными месторождениями. По запасам и содержанию полезных компонентов многие из таких объектов могут быть отнесены к техногенным месторождениям. Техногенные месторождения являются важным источником многих видов минерального сырья.

Суммарное содержание полезных компонентов, накапливающихся за десятки лет в техногенных месторождениях, сопоставимо, а иногда и превышает их количество в ежегодно добываемых рудах. Например, содержание железа в отходах черной металлургии нередко превышает 30%, что позволяет считать их полноценным вторичным железорудным сырьем, которое может быть подвергнуто обогащению для получения железорудного концентрата. Кроме того, некоторые виды металлургических отходов не нуждаются даже в обогащении и могут быть приравнены к рудным концентратам. Накопленные техногенные отходы также могут служить сырьем для производства продукции для промышленности строительных материалов и дорожного строительства, химической отрасли, сельского хозяйства, цветной металлургии, для получения драгоценных и редкоземельных металлов.

Необходимо отметить, что до настоящего времени в России не существует единого реестра объектов размещения отходов и тем более отсутствует идентификация объектов размещения промышленных отходов как техногенных месторождений. Ю. С. Юсфин отмечает, что «техногенные месторождения, в отличие от природных месторождений, возникли как непланируемая продукция, и их запасы формировались стихийно. Отраслям народного хозяйства было выгодно использовать первичное сырье, и анализом техногенных месторождений практически никто не занимался. Можно сказать, что техногенные отходы — это сырье неизвестно для чего, сырье без дальнейшей судьбы».

В настоящее время в РФ в отвалах и хвостохранилищах находится около 80 млрд т отходов от добычи и переработки полезных ископаемых. В 12 млрд т накопленных твердых

отходов содержание ценных компонентов нередко выше, чем в рудах природных месторождений. К тому же эти отходы по своим технологическим свойствам и запасам зачастую превосходят руды, добываемые из недр.

Наиболее значительными по объему являются гидроотвалы и хвостохранилища. По данным Госгортехнадзора РФ, в 2000 г. в эксплуатации находилось 300 хвостохранилищ. Наибольшее количество отходов накоплено на Урале, в Приморском крае, в Мурманской, Белгородской, Кемеровской и Тульской областях.

В табл. 18.2 показана структура металлургического производства Российской Федерации по экономическим районам, которая свидетельствует о неравномерности распределения по регионам стадий металлургического производства, являющихся основным источником образования отходов: добычи и обогащения железных руд, выплавки чугуна и стали.

Таблица 18.2. Структура металлургического производства Российской Федерации (по экономическим районам)

Экономические районы	Добыча железных руд	Обогащение железных руд	Выплавка чугуна	Выплавка стали
Северный	+	+	+	+
Северо-Западный	-	-	-	+
Центральный	+	-	+	+
Волго-Вятский	-	-	-	+
Центрально-Черноземный	+	+	+	+
Поволжский	-	-	-	+
Северо-Кавказский	-	-	-	+
Уральский	+	+	+	+
Западно-Сибирский	+	+	+	+
Восточно-Сибирский	+	+	-	+
Дальневосточный	-	-	-	+

На основании анализа статистических отчетов металлургических предприятий, содержащих данные о динамике развития различных отраслей металлургического производства за период с 1913 по 1995 г., ориентировочно оценены объемы накопления отходов, которые авторы относят к техногенным грунтам (табл. 18.3).

Как видно из табл. 18.3, отходы металлургии присутствуют во всех экономических районах Российской Федерации, что подтверждает актуальность и необходимость проведения работ для сокращения отходов.

Общие объемы накопленных отходов черной металлургии на 1995 г. оценены в 16,5 млрд м³. Наиболее значительные объемы отходов накоплены в Уральском и Центрально-Черноземном экономических районах.

Огромные площади на территории России — около 1 млн га — занимают шлаковые отвалы металлургического производства. К наиболее насыщенным шлаковыми отвалами относится Уральский регион. Например, площадь шлакового отвала Челябинского электрометаллургического комбината (ЧЭМК) составляет 38 га, высота его бортов — 28 м, а мощность самого тела, по данным бурения скважин Южно-Уральской геологоразведочной партии, колеблется от 16,4 до 31 м. Аналогичная ситуация и на НЛМК. На территории комбината размещены шлаковые отвалы площадью около 40 га, на которых хранится около 3 млн т доменных шлаков, шламонакопители доменной газоочистки площадью около 180 га, полигоны твердых, жидких и маслоотходов.

Таблица 18.3. Характеристика накопления объемов основных типов отходов черной металлургии (млн м³)

Экономические районы России	1913–1969 гг.	1970–1979 гг.	1980–1989 гг.	1990–1995 гг.	Общие объемы
Объемы вскрышных пород					
Северный	37,0	136,1	381,9	195,9	750,9
Центральный	27,3	–	–	–	27,3
Центрально-Черноземный	678,5	493,3	777,1	285,4	2234,3
Уральский	3953,66	67,4	184,8	92,8	4298,7
Западно-Сибирский	236,34	189,24	11,95	6,8	444,3
Восточно-Сибирский	45,5	133,2	215,8	121,1	515,6
ВСЕГО	4978,3	1019,24	1571,6	702,0	8271,1
Объемы хвостов обогащения					
Северный	72,3	205,7	359,1	243,7	880,8
Центрально-Черноземный	3,7	230,0	607,9	378,0	1219,6
Уральский	88,6	288,2	562,9	305,0	1244,7
Западно-Сибирский	н. д.	н. д.	(с 1985 г.) 42,6	28,4	71,0
Восточно-Сибирский	29,6	143,8	153,3	89,5	416,2
ВСЕГО	194,2	867,7	1725,8	1044,6	3832,3
Объем доменных шлаков					
Северный	23,4	51,0	60,22	40,4	175,02
Центральный	19,2	19,59	20,67	11,6	71,06
Центрально-Черноземный	59,5	69,6	91,16	39,6	259,86
Уральский	316,2	219,7	257,56	111,8	905,26
Западно-Сибирский	97,6	88,1	93,17	41,1	319,97
ВСЕГО	516,0	447,9	522,8	244,5	1731,17
Объемы сталеплавильных шлаков					
Северный	58,1	65,08	83,5	50,65	257,3
Северо-Западный	22,6	11,3	12,7	4,73	51,2
Центральный	13,9	14,4	13,41	4,55	46,3
Центрально-Черноземный	89,9	65,48	93,76	47,76	296,9
Волго-Вятский	8,9	16,58	18,26	7,16	50,9
Поволжский	36,9	24,5	28,8	9,56	99,8
Северо-Кавказский	23,7	14,1	13,82	5,28	56,9
Уральский	449,8	362,2	403,5	16,62	1381,7
Западно-Сибирский	123,91	97,44	117,14	50,57	389,1
Восточно-Сибирский	6,43	5,7	6,7	2,29	21,6
Дальневосточный	8,01	8,69	10,51	4,26	31,5
ВСЕГО	812,1	686,0	802,1	353,0	2682,7

Наиболее значительное количество техногенных месторождений сформировалось на Урале. За 300-летний период интенсивного горно-металлургического производства на Урале накоплены миллиарды кубометров отходов. Среди учтенных техногенно-минеральных объектов преобладают объекты с запасами отходов до 5 млн т (107 объектов). На 59 объектах сосредоточено отходов от 5 до 50 млн т. Только на 22 объектах запасы накопленных техногенных отходов составляют свыше 50 млн т на каждом из них (Гороблагодатское РУ, Высокогорский и Качканарский ГОКи, Ураласбест, Первоуральское РУ и др.). В отвалах горнодобывающих предприятий накоплено: Гороблагодатское рудоуправление — вскрышных пород 322,6 млрд м³, хвостов обогащения — 143 млрд м³; Первоуральское рудоуправление — вскрышных пород 35 млрд м³, скальных пород 21,7 млрд м³, хвостов СМС 35 млрд м³; Качканарский ГОК — вскрышных пород 575 млрд м³, хвостов ММС 741 млрд м³;

Магнитогорский МК — вскрышных пород 769 млрд м³, хвостов ММС 36,3 млрд м³; Бакальское р/у — вскрышных пород 336 млрд м³, хвостов ММС 37 млрд м³; Орско-Халиловский МК — вскрышных пород 14 млрд м³. Наибольший объем размещения отходов — у Качканарского ГОКа. На территории Черемшанского шламохранилища Высокогорского ГОКа площадью 260 га накоплено свыше 40 млн т отходов обогащения железных руд. На территории металлургического завода им. А. К. Серова расположено шлакохранилище (42 га) доменных и мартеновских шлаков и шламохранилище. На Верхнесалдинском металлургическом производственном объединении (ВСМПО) накоплены отвалы высокотитанистых литейных шлаков (36,1 тыс. т). На территории НТМК находятся такие крупные техногенные месторождения, как отвал доменных шлаков (30 млн т) и отвал сталеплавильных шлаков (21 млн т), а также шламохранилище конвертерных пылей и шламов доменного и мартеновского производств в количестве 361,8 тыс. т. На Алапаевском метзаводе скопилось свыше 100 тыс. т доменных шламов.

Отходы черной металлургии Южной Сибири и Кузбасса сосредоточены в 44 породных отвалах объемом 320 млн м³, в 18 отвалах сухой магнитной сепарации (83,5 млн м³), в отвалах мокрой магнитной сепарации Абагурской и Мундыбашской агломерационно-обогачительных фабрик (более 100 млн т), в шлаковых отвалах доменного производства Кузнецкого (КМК) и Западно-Сибирского (ЗСМК) металлургических комбинатов (соответственно 36 и 29,4 млн т), в отвалах сталеплавильных шлаков КМК и ЗСМК (соответственно 14,4 и 28 млн т). Только на территории г. Новокузнецка — промышленного центра Кузбасса — находится 2 крупнейших объекта размещения техногенных отходов: хвостохранилище Абагурской ОАФ площадью 400 га и шламонакопитель ЗСМК площадью 300 га. Шламонакопитель ЗСМК является формирующимся техногенным месторождением с расчетными запасами железосодержащего сырья со средней концентрацией 54,27% свыше 700 тыс. т.



Рис. 18.1. Объекты размещения техногенных отходов в Кемеровской области:

- а) хвостохранилище Абагурской ОАФ; б) шламонакопитель Западно-Сибирского металлургического комбината; в) отвал отходов коксохимического производства; г) флотхвостохранилище отходов углеобогащения ЦОФ «Абашевская»

Необходимо отметить, что стимулом для вовлечения в переработку железосодержащих отходов за рубежом является высокая плата за их складирование в отвалах, которая в США и Канаде, например, составляет 85–90 долл./т, т. е. около 6 000 руб./т. В России плата за размещение таких отходов, как правило, относящихся к IV классу опасности, в 2018 г. составила 663 руб./т, то есть примерно в 9 раз ниже. Поэтому развитие технологий переработки вторичных ресурсов в значительной степени зависит от мер государственного регулирования и стимулирования этого направления.

ПОТЕНЦИАЛ ОТХОДОВ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КАЧЕСТВЕ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ

Металлургические шлаки

Шлак сопутствует всем современным технологическим процессам производства черных металлов. Шлаки доменного производства содержат невосстановленные соединения, а в состав сталеплавильных шлаков входят вновь образовавшиеся продукты окисления и соединения, поступающие при плавлении.

Металлургические шлаки представляют собой многокомпонентные системы, в которых оксидами, определяющими их состав, являются CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO и FeO. Кроме этого, они содержат оксиды Mn, P, Cr, V, Ti и др. Высоким содержанием остаточного железа характеризуются только конвертерные шлаки, в то время как доменные и электросталеплавильные шлаки имеют преимущественно алюмосиликатный состав.

В табл. 18.4 представлены данные о химическом составе шлаков доменного и сталеплавильных (конвертерный, электросталеплавильный) процессов и видах традиционно производимой в мире шлаковой продукции.

Таблица 18.4. Химический состав металлургических шлаков и виды шлаковой продукции

Вид шлака	Содержание компонентов, %								Виды продукции
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	TiO ₂	FeO	P ₂ O ₅	
Доменный	43– 50	32– 40	6– 9	4– 8	0,1– 1,0	0,2– 1,4	0,2– 0,9	–	Гранулированный шлак — производство цемента Шлаковая пемза — заполнитель легких бетонов Известковое удобрение Щебень, песок — дорожное строительство, бетоны, шлакоминеральные активные смеси, обратные засыпки в строительстве
Конвертерный	41– 56	11– 22	1– 3	2– 5	3– 6	–	8– 20	0,1– 10	Дробленый шлак — для выплавки чугуна Щебень и песок — дорожное строительство Известковые и фосфорные удобрения
Электросталеплавильный	3– 45	15– 26	3– 11	10– 20	1– 8	–	1,3– 1,8	–	Щебень и песок — дорожное строительство Известковое удобрение

Основными видами продукции из шлаков как в России, так и за рубежом являются гранулированный шлак, щебень и песок, оборотный продукт для металлургии, пемза, известковые и фосфорные удобрения. Менее массовым является производство шлаковой ваты, литых

изделий, высокоглиноземистого клинкера. Вторичным продуктом, производимым из гранулированных шлаков, являются шлакоситаллы.

Мелкодисперсные отходы металлургического производства

Мелкодисперсными отходами в черной металлургии являются пыли и шламы газоочистных сооружений и аспирационных устройств. Шламы и пыли в металлургии представляют собой остатки сырья и продуктов его переработки, возникающие в процессах металлургического производства. Основные виды мелкодисперсных отходов представлены в табл. 18.5.

Металлургические пыли и шламы относятся к группе железосодержащих отходов, которые классифицируются по массовой доле железа на:

- а) богатые — массовая доля железа 55–67% (шлам и пыль газоочисток конвертерных цехов);
- б) относительно богатые — массовая доля железа 40–55% (шламы и пыли аглофабрик, газоочисток и подбункерных помещений доменных печей);
- в) бедные — массовая доля железа менее 40% (шлам и пыль газоочисток электросталеплавильных печей).

Химический состав пылей и шламов зависит от состава сырья и технологического процесса и может меняться в существенных пределах на различных заводах и в разные периоды времени.

В табл. 18.5 приведены усредненные данные о химическом составе пылей и шламов черной металлургии.

Таблица 18.5. Химический состав пылей и шламов черной металлургии, %

Элементы и соединения	Агломерационные	Доменные	Конвертерные	Эл./стале-плавильные
Fe _{общ}	22–58	40–55	41–67	30–55
Fe ₂ O ₃	27–70	20–60	39–78	
FeO	3–22	5–9	5–67	
CaO	2–21	4–10	3–20	1,5–17,0
SiO ₂	4–10	6–11	1,4–2,9	2–12
Al ₂ O ₃	1,5–3	2–4	0,11–0,36	0,3–10,0
MgO	1–6	1–3	0,15–1,48	5,0–27,0
K ₂ O	0,09–0,22	0,12–0,53	0,1–0,26	0,3–1,0
Na ₂ O	0,05–0,16	0,1–0,3	0,1–0,61	1,0–2,0
TiO ₂	0,1–0,37	0,1–0,4	0,03–0,05	0,2–0,6
Mn	0,08–0,41	0,1–0,5	0,74–1,68	1,5–5,5
P	0,02–0,27	0,03–0,23	0,04–0,18	0,02–0,25
Cr ₂ O ₃	0,01–0,04	0,01–0,14	0,01–0,06	До 0,36
V ₂ O ₅	0,01–0,08	0,01–0,1	0,01–0,23	0,01–0,1
S	0,14–0,78	0,2–0,9	0,04–0,32	0,02–0,5
BaO	0,01–3,49	0,03–0,86	0,01–0,03	
Ni	0,004–0,079	0,01–0,03	0,01–0,04	0,02–8,0
Cu	0,01–0,04	0,01–0,02	0,01–0,07	0,1–0,5
Zn	0,01–0,09	0,5–15,4	0,18–4,16	До 30,0
Pb	0,01–0,10	0,1–0,6	0,01–0,61	До 5,0
Mo	0,002–0,004	0,002–0,02	менее 0,002	0,01–0,09
Sr	0,004–0,10	0,001–0,01	0,004–0,02	
As	0,002–0,03	0,002–0,005	0,002–0,02	
C	1,78–12,06	6–26	0,7–4,32	0,5–3,0

Известно, что шламы, содержащие от 37 до 52% Fe_{общ}, от 4 до 15% С, оксиды кальция, магния, марганца, алюминия, кремния, относятся к ценному техногенному сырью. Согласно техническим требованиям к качеству железосодержащих пылей и шламов, при их утилизации в металлургии суммарное содержание в них железа, углерода, а также оксидов Са и Mg должно быть не ниже 45%. Наибольшую ценность для черной металлургии имеет железо, содержание которого в мелкодисперсных отходах достигает 55–67%. Пыль электропечей, основная составляющая шихты которых — металлолом, содержит значительные количества цветных металлов: Zn (до 30%), Pb (до 8,0%) и др.

Ускоренное развитие прокатного производства привело к значительному увеличению расхода воды на охлаждение оборудования и образованию прокатной окалина. По химическому составу окалина близка к чистому магнетиту (65–72% Fe), а по гранулометрическому составу представлена в основном фракцией менее 0,2 мм. Прокатная окалина из отстойников прокатных станков (вторичная, или замасленная) имеет влажность 20–30%, содержание смазок — 2–3%, содержание железа — 60–70%.

РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Историческое развитие переработки металлургических шлаков

Переработка металлургических шлаков получила широкое распространение в мире. На современных металлургических заводах не только утилизируются все образующиеся шлаки, но и постепенно разрабатываются старые шлаковые отвалы. Переработка и использование шлаков в настоящее время представляют собой самостоятельную подотрасль металлургического производства.

В 1901 г. А. И. Брезгунов предложил применять основные мартеновские шлаки в шихте доменных печей и этим положил начало использования шлаков в самой металлургии. Однако в анализе состояния переработки и использования шлаков в США указывается, что на протяжении долгой истории развития черной металлургии было разработано и применено много выдающихся открытий для улучшения производства чугуна и стали, но даже в 1966 г. не было единого высокоэффективного метода, который позволил бы перерабатывать значительное количество шлака в продукцию, удовлетворяющую основным требованиям потребителя.

В 1908 г. компания «Карнеги Стил» (США) начала исследование возможных областей применения доменного шлака. В 1911 г. в отчете компании «Карнеги Стил» «Использование доменного шлака в производстве бетона» впервые обоснованно говорилось о возможности использовать доменный шлак в производстве бетона.

Потребители не сразу оценили по достоинству шлаковые материалы. Дорожники возражали против использования шлаков, так как из-за шероховатой поверхности и пористости шлака расходовалось больше асфальта. Строители определили шлак как нежелательный материал для использования в бетонных конструкциях. Железнодорожники скептически отнеслись к балласту из шлака, опасаясь, что высокое содержание металла в нем может вызывать замыкание сигнальных автоматических систем.

К 1917 г. стало очевидно, что шлак является ценным продуктом и что компаниям — производителям шлака стоит объединиться для более эффективного продвижения нового продукта.

Для координации решений технических проблем, возникающих при развитии новых направлений использования шлаков, разработки технических условий и усиления контроля за производством шлаковой продукции в 1918 г. в США была создана Национальная шлаковая ассоциация, заслугой которой стало создание шлакоперерабатывающей индустрии в США.

Позже во многих странах были созданы специальные институты и организации, занимающиеся вопросами использования шлака в строительстве, иногда на базе металлургических заводов: во Франции — Техническая ассоциация по изучению и использованию доменных шлаков, в Канаде — Национальная шлаковая ассоциация, в Англии — Британская ассоциация шлака. В 2000 г. Европейской конференцией по шлакам в Дюссельдорфе была основана общеевропейская ассоциация шлаков ЕВРОШЛАК, ядром которой стал немецкий исследовательский институт металлургических шлаков РЕПЗ.

Организация переработки шлаков в разных странах неодинакова, что объясняется специфическими условиями каждой страны. Первые шлакоперерабатывающие заводы были пущены в США самими металлургическими предприятиями. В 1919 г. в США существовало 14 компаний — производителей шлака, которым принадлежало 32 завода. Позже шлаки передали специализированным объединениям. В настоящее время в США переработка шлака осуществляется в основном компаниями, независимыми от металлургов. В Англии и Германии шлаковую продукцию получают непосредственно на металлургических заводах, в других странах шлак в жидком состоянии или частично обработанный передают компаниям и специальным фирмам по производству строительных материалов.

В настоящее время в мире перерабатывается около 100% доменных шлаков и 80–90% сталеплавильных. В табл. 18.6 приведены данные о переработке металлургических шлаков за рубежом к началу XXI в. без учета их потребления на собственные нужды металлургических предприятий.

Таблица 18.6. Использование металлургических шлаков за рубежом

Страна	Образование шлаков, млн т/год			Переработано, %, доменные/сталеплавильные	Направления использования
	всего	доменные	сталеплавильные		
Япония	> 40	28–30	8–10	> 90/80	Строительные материалы (щебень, цемент, бетон и др.), дорожное строительство, стекольное производство, удобрения
Германия	15–16,5	11–11,8	4	100/>90	Строительные материалы (щебень, брусчатка, цемент, шлаковата, пемза, газобетон и др.), удобрения
США	27	20	> 6	95/>70	Строительные материалы (щебень, пемза, цемент и др.), тарное стекло, покрытие дорог, удобрения
Франция	> 16	14	2,3	> 90	Строительные материалы (щебень, пемза, наполнители бетонов), покрытие дорог, литейное производство, удобрения
Великобритания	> 13	10–11	> 2	100/90	Дорожное, аэродромное и промышленное строительство (щебень — > 70%, шлаковая пемза, бетоны, шлакоситалл, шлаковата и др.)
Канада			1,5	100/90	Строительные материалы (щебень, гранулированная пемза, цемент, кирпич), покрытие дорог

Металлургический шлак признан минеральным сырьевым материалом. В США, Великобритании, Германии, Франции воздушно охлаждаемые металлургические шлаки в основном перерабатывают на щебень, применяемый в качестве балласта при строительстве железных дорог, а также используют в качестве заполнителя при сооружении аэродромных покрытий

и автомобильных дорог. Асфальтобетонные покрытия с применением шлакового заполнителя характеризуется высокой прочностью, устойчивостью к истиранию, большим коэффициентом сцепления, отсутствием сдвиговых деформаций. Вся продукция шлакопереработки экономически выгодна. Например, шлаковый щебень в 1,5–2 раза дешевле природного и требует в 4,5 раза меньше удельных капитальных вложений. Шлаковая пемза в 3 раза дешевле керамзита и требует в 1,5 раза меньше удельных капитальных вложений.

На рис. 18.2 представлены направления использования металлургических шлаков на заводах крупнейшей в мире международной металлургической компании ArcelorMittal, имеющей производственные мощности в 18 странах.

В СССР показатели по переработке и использованию доменных и сталеплавильных шлаков в течение многих лет были существенно ниже, чем в странах с развитой металлургией. В настоящее время в России 86% металлургических шлаков используется в качестве сырья в промышленности строительных материалов и как замена природного щебня, 10% — в качестве металлосодержащего сырья для передела на металлургических заводах в РФ и 4% — экспортируется как стройматериал или металлургическое сырье.



Рис. 18.2. Направления использования металлургических шлаков на заводах компании ArcelorMittal

Доменные шлаки

Выдающийся металлург академик И. П. Бардин писал, что шлаки — это не отходы, а ценное строительное сырье.

Самая ранняя попытка использования доменного шлака относится к 1589 г., когда в Германии из него отливали пушечные ядра. В то же время в Европе шлак не имел широкого практического применения до конца XIX в. Впервые гранулированный шлак был применен в качестве добавки при производстве цемента в Германии в 1892 г.

В России шлаки начали применять в конце XVIII — начале XIX в., когда доменные печи достигли сравнительно больших размеров. Литые шлаковые камни в те времена использовали при возведении фундаментов для зданий. В XX в. начался новый этап интенсивных поисков рациональных путей использования и переработки металлургических шлаков. Серьезным тормозом применения шлаков было недостаточное знание их свойств. С развитием металлургии и силикатной промышленности во второй половине XIX в., когда расширилось производство искусственного технического камня, возникла потребность изучения структуры и фазового состава шлаков для определения возможных путей их использования. Однако поскольку в дореволюционной России металлургия и промышленность строительных материалов развивались слабо, такие исследования не носили целенаправленного характера.

В СССР, начиная с первых пятилеток, вопрос о применении шлаков в народном хозяйстве встал очень остро. При интенсивной реконструкции действующих и строительстве новых

предприятий потребовалось огромное количество строительных материалов. В поисках сырьевых ресурсов внимание было обращено на металлургические шлаки, количество которых одновременно с темпами роста производства чугуна и стали быстро возрастало. Период с 1933 по 1937 г. характеризовался для СССР интенсивными исследованиями, выполнением опытных и проектных изысканий по использованию доменных шлаков, для чего в Москве в 1933 г. была создана Всесоюзная контора по шлакопереработке.

В Великобритании, Люксембурге, Германии, Канаде 100% доменных шлаков перерабатывалось еще в конце 80-х гг. XX в., в США — 95%, во Франции и Японии — 90%. При переработке производились следующие виды продукции:

- США — щебень (89%), гранулированный шлак (6%), пемза (5%);
- Германия — щебень (57%), гранулированный шлак (27%), пемза (7%), другое (9%);
- Франция — щебень (40%), гранулированный шлак (50%), другое (10%);
- Япония — щебень (88%), гранулированный шлак (12%);
- Великобритания — щебень (76%), гранулированный шлак (2%), пемза (2%), другое (10%).

По данным общеевропейской ассоциации шлаков ЕВРОШЛАК, из 25 млн т доменных шлаков, образовавшихся в 2000 г. в европейских странах, почти 100% было использовано: около 60% — в производстве цемента, а остальная часть — в других сферах строительной индустрии: при изготовлении бетонных изделий и строительстве дорог.

Наиболее крупными потребителями доменного шлака являются цементная промышленность (в Японии — 70% доменного шлака, в Германии — 55%) и дорожное строительство (в Японии — 20%, Германии — 40%).

Исторически сложилось так, что доменные гранулированные шлаки в России и некоторых европейских странах используются преимущественно для производства вяжущих материалов, особенно для производства шлакопортландцемента. Шлакопортландцемент — это гидравлическое вяжущее вещество, твердеющее в воде и на воздухе, получаемое совместным тонким измельчением портландцементного клинкера и гранулированного шлака. Содержание шлака в шлакопортландцементе по ГОСТ 10178–85 должно составлять 21–60% массы цемента. По американскому стандарту содержание шлака должно составлять от 25 до 65%, по английскому — не больше 65%. В Германии стандартизованы два вида шлакопортландцемента: железопортландцемент, содержащий не более 35% шлака, и доменный цемент с содержанием шлака от 31 до 85%. Во Франции выпускают 4 вида шлакопортландцемента: железопортландцемент с 20–30% шлака, смешанный металлургический цемент с 50% шлака, доменный цемент с 70% шлака и шлако-клинкерный цемент, содержащий не менее 80% шлака. Каждый из этих видов цемента делится на две марки по прочности. В Германии каждый вид шлакопортландцемента имеет три марки по прочности, а в Англии и США — только одну марку, как и обыкновенный портландцемент.

Шлакопортландцементы широко применяются в настоящее время во многих странах для общих строительных работ, для гидротехнических сооружений и для сборных железобетонных изделий (например, бетонные трубы). По прочности они не уступают портландцементу, но нуждаются в более тщательном уходе при повышенных и пониженных температурах.

В Российский справочник наилучших доступных технологий (НДТ) ИТС 6-2015 «Производство цемента» включена замена природных сырьевых компонентов отходами производства, прежде всего, металлургическими шлаками (до 80% карбонатного или алюмосиликатного компонента), а также железосодержащими хвостами, шламами и пылями черной металлургии (до 100% железосодержащего компонента). В то же время в России в последние годы наблюдается снижение использования доменных гранулированных шлаков цементной промышленностью в связи с падением спроса на шлакопортландцемент. В связи с этим приобретает большое значение расширение масштабов производства шлакового заполнителя, в том числе шлаковой пемзы, которая является заменителем керамзита, а также литого шлакового щебня для тяжелых бетонов.

Бетоны с заполнителем из доменных гранулированных шлаков отличаются рядом преимуществ перед традиционными бетонами. Доменный шлак в составе портландцементного бетона выполняет функцию активного заполнителя, т. е. его поверхностный слой реагирует с гидроксидом кальция, выделяющимся при гидролизе алита. При этом образуется дополнительное количество гидросиликатов кальция, которые создают чрезвычайно прочную связь заполнителя с цементной матрицей; полностью исчезают капиллярные каналы, которые в результате усадки цементного камня образуются между ним и поверхностью заполнителя. Это приводит к значительному повышению коррозионной стойкости бетона с активным заполнителем по сравнению с традиционными составами в большинстве агрессивных сред, в том числе даже против такого грозного вида химической агрессии, как кислотная. Кроме этого, благодаря специфической структуре и отсутствию микрозазоров на границе раздела вяжущего и заполнителя, такие бетоны обладают отличительными физико-механическими характеристиками. Именно этим обусловлено широкое применение бетонов на шлаковом заполнителе в США, Японии и других странах.

В мировой практике нет единого направления в применении шлаков и продукции из них, что объясняется спецификой каждой страны. Так, в Великобритании и Германии шлак перерабатывают непосредственно на металлургических заводах, а в США шлак перерабатывали в середине XX в. 36 компаний, в том числе: 18 производили шлаковую пемзу, 17 — гранулированный шлак, 39 — водоохлажденный шлак.

В США гранулированные доменные шлаки используют для производства цемента и удобрений, для известкования кислых почв, в производстве бетона, тарных стекол (содержание шлаков в шихте до 30%), битумных масс для автомобильных дорог, железнодорожного балласта, для восстановления нарушенных земель.

Во Франции граншлак из доменных шлаков и шлаковый щебень используют для строительства дорог, в качестве наполнителя бетонов.

В Японии щебень из доменных шлаков используют для инженерной подготовки местности, дорожного строительства, гранулированный шлак — для производства различных строительных материалов (заполнителей бетонов, цементов и др.) и изделий (противопожарных панелей, волнорезов и др.).

В Великобритании большую часть доменных шлаков в гранулированном виде применяют со шлаковой пемзой для производства бетонов, шлаковаты, шлакокерамики.

В Канаде производят окомкованный доменный шлак, который используют в качестве вяжущего в строительстве.

В Австрии из доменных гранулированных шлаков получают высококачественные изоляционные материалы сложной конфигурации, которые применяются в строительстве, электротехнике и в химической промышленности (кислотостойкий материал).

В Германии шлаковый щебень используют для дорожного, аэродромного и промышленного строительства, из гранулированных доменных шлаков производят шлаковый цемент, шлаковую пемзу используют в качестве пористого заполнителя для изготовления теплоизоляционных и легкобетонных изделий, молотые фосфатшлаки применяют в сельском хозяйстве. Спрос цементной промышленности на гранулированный доменный шлак в Германии превышает объемы его производства вследствие: снижения общего энергопотребления при производстве клинкера, экономии природных ресурсов (известняка, мергеля), высокой стоимости сертификатов на выброс углекислого газа, при этом выбросы CO₂ снижаются более чем в 3 раза при 75%-ной замене клинкера шлаком.

В СССР длительное время изучением, использованием и даже переработкой металлургических шлаков занимались организации строительной отрасли. В 1966 г. при УралНИИЧМ был создан научно-исследовательский отдел — головной по шлакам в СССР. Отдел шлакопереработки был создан также в Гиромезе. В результате внедрения отечественных разработок в 70-х гг. XX в. уровень использования доменных шлаков резко возрос и составил

в 1977 г. 80,1%. Была поставлена задача к 1980 г. перевести все металлургические предприятия на работу без шлаковых отвалов и к 1990 г. ликвидировать существующие отвалы.

На металлургических заводах СССР к началу 90-х гг. XX в. из доменных шлаков производили следующие виды продукции:

- гранулированный шлак (72%);
- щебень (23%);
- пемза (4%);
- шлаковата (0,3%);
- высокоглиноземистый клинкер (0,2%);
- литые изделия (0,1%).

В 1990-х гг. эксплуатировалось 40 установок по производству гранулированного лака, в том числе 25 установок использовали полусухой способ грануляции (17 — гидрожелобной, 8 — барабанный), 11 установок применяли мокрый способ (желобной — 1, бассейновый — 10) и 4 припечные установки.

Гранулированный шлак начали получать еще в XIX в., охлаждая расплавленный доменный шлак водой. В дальнейшем технологии грануляции шлака развивались и совершенствовались.

Из всех существующих способов грануляции доменных шлаков используют в основном три:

1. Мокрое гранулирование — на текущую струю расплавленного шлака подают струю воды, и обе струи падают в бассейн с водой. В результате расплавленный шлак разбрызгивается, и эти брызги затвердевают в воде в виде мелких зерен, или гранул.

2. Полусухое гранулирование — расплавленное вещество, смешанное со струей воды, подают на вращающийся барабан с лопастями, с которых оно отбрасывается в виде капель. При падении в воздухе эти капли затвердевают.

3. Сухое гранулирование — расплавленное вещество гранулируют под воздействие сжатого воздуха, азота или водяного пара.

По размещению грануляционных установок способы грануляции подразделяются на центральные (внепечные) и припечные.

Грануляция в бассейнах — самый старый способ, еще встречающийся на практике и заключающийся в том, что шлаковый расплав из ковшей сливают в бассейн с водой, в некоторых случаях — в промежуточный наклонный желоб.

В России основная масса гранулированного шлака (88,3%) производится на центральных установках преимущественно полусухим гидрожелобным способом.

Гидрожелобные установки в СССР начали вводить в действие с 1958 г. Установка состоит из 6–9 гидрожелобных агрегатов, каждый из которых включает стальной гидрожелоб длиной 9–10,5 м, установленный под углом 3° с подъемом к концу, к которому примыкает приемная ванна. С торца гидрожелоба смонтирована гидронасадка, в которую подается вода под давлением 0,4–0,8 МПа, которая подхватывает стекающий в гидрожелоб жидкий шлак, дробит его на капли, охлаждает и отбрасывает на расстояние до 40 м. При штабелировании шлака происходит частичное обезвоживание продукции, а стекающая вода возвращается в систему обратного водоснабжения.

Недостаток центральных грануляционных установок, расположенных за пределами доменного цеха, состоит в том, что для них требуется значительная протяженность железнодорожных путей, большой парк шлаковозных ковшей и локомотивов. За время транспортировки температура огненно-жидкого шлака снижается на 100–150°С, что ухудшает качество гранулята как материала для производства вяжущих веществ. Кроме того, 30–35% шлака уходит на образование корок, коржей и настелей в ковшах. Это определяет относительно низкий выход гранулированного шлака (не более 75%) из исходного огненно-жидкого шлака.

Наиболее рациональным методом переработки шлака является грануляция шлака на припечных установках, исключая из эксплуатации парк шлаковозных ковшей, что значительно упрощает организацию и удешевляет производство. Эксплуатационные затраты при припечной грануляции шлака на 44% ниже, чем при центральной грануляции; капитальные затраты ниже на 55%. Установки припечной грануляции шлака распространены в Японии, Франции, Германии.

На заводах Японии распространен способ припечной грануляции, разработанный компаниями «Раза трейдинг» и «Ниппон кокан».

Выпускаемый из печи шлак поступает в гидрожелоб, куда подается вода. Шлаководяная пульпа из приемного бункера насосом перекачивается в обезвоживающие резервуары с перфорированными стенками и дном, через которые осуществляется фильтрация воды, возвращаемой на грануляцию.

В Германии система грануляции разработана компанией «АИО-Штальбау и Хеш» и используется на многих заводах. Основные технологические операции: грануляция путем впрыскивания воды в поток шлака; подача пульпы в обезвоживающие резервуары; обезвоживание через фильтрующий слой.

Использование воды в мокрых способах грануляции шлака требует значительных затрат на организацию оборотного водоснабжения, ее очистку и обезвоживание получаемого граншлака. Поэтому более современными и перспективными являются технологии полусухого (барабанный) или сухого гранулирования.

Сухая грануляция проводится воздухом или газом под давлением порядка 0,4–0,6 МПа, которые воздействуют на струю шлакового расплава и измельчают его. Гранулы, пролетая несколько метров, охлаждаются, затвердевают и попадают в емкость для сбора. Сухой способ грануляции доменного шлака с применением сжатого воздуха используется компанией «Синнихон сэйтэцу» (Япония), расход воздуха составляет 2400 м³/мин при давлении 6,5 кПа.

Японскими компаниями «Мицубиси дзюкоге», «Ниппон кокаи» и «Тайхэйе киндзоку» разработаны установки воздушной грануляции доменного и конвертерного шлаков, которые эксплуатируются на заводах фирмы в Фукуяме. Шлаковый расплав из ковша подается в отделение предварительной обработки, где в него вносят, для улучшения качества продукта, различные добавки для регулирования температуры и вязкости расплава. После этого расплав по желобу поступает в грануляционную камеру, где его дробит струя воздуха, подаваемого под давлением. Для достижения заданных свойств гранулированного шлака в зависимости от свойств расплава регулируют соотношение скоростей движения потоков воздуха и жидкого шлака. Тепло утилизируется излучением из потока частиц, а также из слоя, в который падают частицы. На одной из доменных печей в Фукуяме работает установка придоменной грануляции расплава, в которой струю расплава направляют в лоток между двумя вращающимися в разные стороны барабанами, поверхность которых охлаждается водой. В установке используется до 38% тепла жидких шлаков.

Фирма «Сумито киндзоку коге» создала установку сухой грануляции доменного расплава с утилизацией его тепла. Процесс грануляции расплава осуществляют на вращающемся барабане. Гранулят затем затвердевает в псевдооживленном слое твердого шлака. Установка работает при температуре нижнего слоя до 700°С и производительности до 50 т/ч. Вращающаяся чаша — воздуходушный распылитель, полученный гранулят отличается большой плотностью (2,8–2,9 г/см³) и пригоден в качестве мелкого заполнителя для бетонов. На установке утилизируется 55% физического тепла шлака.

В Швеции в Swedish State Steel Company, Merax LTD развивается процесс грануляции и утилизации тепла шлака. Шлак гранулируется ударением падающего слоя частиц ранее отвердевшего шлака. Пленка разрушается на гранулы, которые затем падают в многоярусный псевдооживленный слой, из которого утилизируется тепло. По этому методу более 60% тепла

шлака утилизируется в виде пара. Большое содержание стеклофазы в данном шлаковом продукте делает его пригодным для производства цемента.

В Австрии для размельчения шлакового расплава используют устройство распылительной камеры круглого сечения, по оси которого из промежуточного ковша поступает струя жидкого шлака, разбиваемая двумя рядами подающих горячий газ, или топливных горелок. Частишки шлака на дне камеры попадают на вращающийся диск, разбрасывающий их центробежной силой в кольцевую приемную камеру с подогреваемыми стенками в зоне поступления раздробленных частичек шлака и с охлаждаемыми со стороны кольцевой разгрузочной камеры.

Компания Paul Wurth (Люксембург) подошла к решению проблемы сухой грануляции шлака, предложив простой, но эффективный метод: стальные шарики смешиваются с жидким шлаком для быстрого охлаждения доменного шлака. При этом получают желаемый продукт с максимальной возможной долей энергии. Основываясь на результатах многочисленных экспериментальных исследований, подтвердивших качество шлака и его пригодность для использования в цементном производстве, компания Paul Wurth соорудила полномасштабную пилотную грануляционную установку на доменной печи № 4 завода Rogesa. Первая очередь пилотной установки была успешно введена в эксплуатацию в конце 2013 г. и может обрабатывать до 8 т/мин жидкого доменного шлака.

В России различные варианты технологии воздушной грануляции шлаковых расплавов разработаны ОАО «Уральский институт металлов», которые опробованы в промышленных условиях на ОАО «Северсталь». Сравнение эксплуатационных затрат показывает, что воздушная грануляция шлаковых расплавов в 1,5–2 раза экономичнее водных способов грануляции. Получаемый граншлак имеет низкие значения влажности и пористости и может быть использован в производстве строительных материалов.

В СССР свыше 80% минераловатных изделий производилось из шлаковой ваты, которая изготавливалась как непосредственно из жидких доменных шлаков, так и путем переплавки твердого шлака (щебня). Различают ванный и ваграночный способы производства минеральной ваты. Наиболее распространенным способом является ваграночный, а наиболее рациональным — ванный с использованием жидкого шлака, заливаемого в отапливаемую газом или мазутом ванную печь-миксер регенеративного типа.

Жидкий шлак сливают в шлакоприемник, откуда он по желобу поступает в ванную печь, где его подогревают до 1400–1450°С и затем выпускают с помощью фидеров.

Переработка доменного шлака с получением пемзы в СССР была вторым по важности видом производства после грануляции, что связано с высокой потребностью в пористых заполнителях для крупнопанельного строительства. Технологию производства шлаковой пемзы начали осваивать с 1932 г., а промышленный выпуск начался со второй половины 1950-х гг. В 1974 г. шлаковую пемзу в СССР производили на 7 предприятиях с общим выпуском около 2 млн м³ в год. Для производства шлаковой пемзы применяли следующие способы: траншейно-брызгальный, бассейновый, вододутьевой и гидроэкранный. Самым простым и надежным в эксплуатации являлся траншейно-брызгальный, наиболее перспективным зарекомендовал себя гидроэкранный.

В траншейно-брызгальных установках шлаковый расплав по мере слива в траншею пронизывается водяными струями, подаваемыми через брызгала под давлением 0,6 МПа. Образуется пористый шлаковый «пирог», который подают в дробильно-сортировочное отделение. Недостатками способа являются низкая производительность и недостаточно высокое качество получаемой пемзы.

Гидроэкранный способ заключается в многократном воздействии на шлаковый расплав струей воды в открытых желобах, оборудованных экранами.

Гидроэкранный способ позволяет получить высококачественную пемзу с равномерной мелкопористой структурой.

Производство шлаковой пемзы, как и гранулированного шлака, сопровождается образованием и накоплением в парогазовой смеси сернистых соединений. Однако скорость охлаждения поризованной массы при гидроэкранным способе получения пемзы значительно ниже, чем гранулированного шлака. В этих условиях десульфурация шлака достигает 40% (по сравнению с 10% при грануляции), что обуславливает увеличение сернистых выбросов в 4 раза. Наряду с сернистыми соединениями в парогазовой смеси, особенно в период охлаждения вспученной массы, имеется пыль, содержание которой доходит до 3–4 г/м³.

По экологическим соображениям и из-за высокой насыпной плотности в 1990 г. прекращено производство шлаковой пемзы на комбинате «Азовсталь» траншейно-брызгальным способом, и до последнего времени ее производили гидроэкранным способом на Новолипецком, Череповецком, Челябинском и Криворожском металлургических предприятиях. В настоящее время из-за больших парогазовых выбросов прекращено производство пемзы этим способом на НЛМК.

Наиболее распространенным в мире способом переработки доменного шлака является производство шлакового щебня, который используется в качестве заполнителя в строительной отрасли. Это направление позволяет вовлечь в строительный комплекс значительно большее количество шлака, чем в производство из него вяжущих веществ. Особенно эффективно производство шлакового щебня при использовании технологии придоменной переработки шлака. При этом используется та тепловая энергия, которая была аккумулирована шлаковым расплавом в процессе производства чугуна. Такая технология позволяет достичь значительной экономии топливно-энергетических ресурсов.

Необходимо отметить, что за рубежом шлаковый щебень производят преимущественно из литого шлака. В Великобритании на этот вид продукции расходуется 90%, в США — 80%, в Германии — свыше 70%, во Франции — более 60% текущего образования доменных шлаков. Это связано с меньшей стоимостью литого щебня в сравнении с обычным, из горных пород, и более высоким его качеством, чем у щебня из отвальных шлаков.

Производство литого щебня — прочного и тяжелого заполнителя для конструктивных бетонов и элементов дорожного строительства — реальный путь в короткие сроки и с большим экономическим эффектом возместить недостаток в нерудных строительных материалах. Для получения литого щебня изготавливают длинные желоба, ведущие в траншеи, которые поочередно заполняются расплавом. После затвердевания шлак убирают с помощью экскаватора и направляют на дальнейшую переработку. Это самый дешевый и наиболее производительный способ получения литого щебня.

Во Франции шлаковым щебнем укрепляют все шоссейные дороги, по которым передвигается тяжелый транспорт. Шлак в битумных дорожных смесях — хороший противоскользкий материал, поэтому покрытия многих больших автомагистралей США и Канады выполнены с использованием шлакового щебня.

При сооружении самых высоких зданий между Нью-Йорком и Чикаго, в том числе в многоквартирных жилых комплексах, компания «Юнайтед Стрейтс Стил» использовала шлак в качестве заполнителя в конструктивных бетонах для фундаментов.

В США компанией «Хьюстон слэг Мэтириэлз» был специально построен завод по производству дробленого доменного шлака, используемого в качестве материала для оснований автодорог и железнодорожного балласта производительностью 250 т/ч. Технологическая схема включала охлаждение шлака в траншеях, отделение чугуна на двухступенчатом грохоте, двухстадийное дробление в щековой и конусной дробилках с получением 5 фракций: 38–22, 22–16, 16–12, 12–6 и менее 6 мм.

Компания «Фаунтин сэнд энд стил» (США) производит щебень для железнодорожного балласта на установке производительностью 600 тыс. т в год.

В Великобритании работает целый ряд дробильно-сортировочных заводов по производству шлакового щебня для дорожных покрытий: завод «Тиспорт Уоркс оф тармак роудстоун» — 1,2 млн т/год, в Скэнтропе — 800 тыс. т/год, в Стэнтоне — 100 т/ч.

В России шлаковый наполнитель используется сравнительно редко, поэтому имеются огромные резервы расширения производства бетонов на шлаковом наполнителе, что позволит ускорить переработку шлаковых отвалов в районах расположения металлургических заводов России.

Сталеплавильные шлаки

Сталеплавильные шлаки включают шлаки конвертерного производства стали — около 60% всего объема, электросталеплавильного — около 30% и шлаки вторичных металлургических процессов — около 10%. В отличие от массово перерабатываемых доменных шлаков, сталеплавильные шлаки в массовом масштабе начали использовать в мире с 1967 г.

В настоящее время коэффициент использования шлака за рубежом достигает 90% и более. За рубежом сталеплавильные шлаки применяют в трех основных направлениях: в сельском хозяйстве — для известкования почв, в дорожном строительстве — в строительстве дорог, а также в качестве железосодержащего материала для вторичной переплавки в доменных печах. Существуют возможности повторного использования сталеплавильного шлака и в самом сталеплавильном производстве:

- в шихте для ускорения шлакообразования;
- оставление части шлака предыдущей плавки в конвертерах и электропечах;
- для внедоменной обработки чугуна.

Однако возможности использования шлаков непосредственно на металлургических заводах ограничены, поэтому за рубежом активно разрабатывают способы применения шлаков в смежных отраслях.

Направления использования конвертерных шлаков за рубежом показаны на рис. 18.3.



Рис. 18.3. Использование конвертерного шлака за рубежом

В среднем в сталеплавильных шлаках содержится 20–25% железа, в том числе 10–15% металлического железа. Значительная доля железа содержится в виде оксидов FeO и Fe₂O₃ и запутавшихся корольков железа. Поэтому проблема обеспечения металлургических предприятий железосодержащим сырьем в определенной степени решается путем переработки шлаков. Для эффективного использования сталеплавильных шлаков необходимо подвергать их комплексной переработке с максимальным извлечением металла, получением щебня, отсевом мелких фракций и их доизмельчением при производстве шлаковой муки.

Важным этапом технологии переработки сталеплавильных шлаков является извлечение из них металла. Основным продуктом шлакопереработки является металлопродукт различных классов по крупности и содержанию железа, который, как правило, возвращается в металлургический передел, заменяя часть первичного сырья. Известно, что металлургический завод фирмы POSCO в Южной Корее производительностью 2,5 млн т стали в год получает экономию от использования металлопродукта, составляющую 3,44 млн долларов.

В США из сталеплавильных шлаков извлекается около 50% содержащегося в них железа, которое направляется в агломерационное или доменное производство, а остаток после извлечения железа применяется в дорожном и гражданском строительстве. Во Франции после извлечения из сталеплавильных шлаков металла неметаллическую фракцию перерабатывают в щебень и порошок для сельского хозяйства. В Великобритании сталеплавильные шлаки используют в битумных бетонных смесях для дорожных покрытий, в производстве щебня, в сельском хозяйстве. В Японии сталеплавильные шлаки используют для собственных нужд предприятий в качестве оборотного продукта, для инженерной подготовки местности, дорожного строительства, для производства различных строительных материалов (заполнителей бетонов, цементов и др.) и изделий (противопожарных панелей, волнорезов и др.), для снижения кислотности почв и в качестве удобрений.

Использованию сталеплавильных шлаков в дорожном и гражданском строительстве препятствует наличие свободной извести. Шлаки, содержащие избыток основных оксидов над кислотными, склонны к самопроизвольному распаду под воздействием влажного воздуха. Такие шлаки непригодны для получения бетона. Шлак расширяется в объеме до 10% вследствие гидратации извести и окиси магния. Необходимо по крайней мере 6 мес. для старения шлака по СаО и несколько лет для завершения гидратации окиси магния. Ранее шлак длительное время хранили в отвалах и стабилизировали известь путем естественного старения. В настоящее время разработаны новые технологии, например, шлак сразу после выпуска из конвертера подвергают обработке водяным паром, достигая эффекта старения, и это позволяет его использовать сразу, без длительной выдержки. Обработанный таким образом шлак дробят, путем магнитной сепарации удаляют металл, который затем возвращают в шихту конвертеров и дуговых печей, а шлак подвергают грохочению и после сортировки отгружают потребителям.

В Японии переработка конвертерного шлака предусматривает извлечение металла и его возврат в производство, немагнитная часть используется для производства щебня и удобрений для сельского хозяйства. По данным компании «Кобэ Сейкодзе», которая создала технологию полной утилизации конвертерных шлаков, технология позволяет из 1 т шлаков получить 720 кг цемента, 30 кг заменителя железистого песка, 50 кг марганцевой руды, 10 кг оксида ванадия, 107 кг удобрений, 165 кг стали.

Как правило, для переработки сталеплавильных шлаков используют стандартное оборудование, предназначенное для горнорудной промышленности или производства строительных материалов.

Мировой опыт показывает, что для максимального извлечения металла (до 94%) из шлака требуется очень тонкое измельчение, осуществляемое за рубежом, как правило, в две стадии на щековых и конусных дробилках: завод компании «Хьюстон слэг мэтириэлз» (США), завод компании «Син ниппон сэйтэцу» (Япония). Безаварийная работа стандартных дробилок при дроблении сталеплавильных шлаков возможна в условиях тщательно организованной системы удаления металла. Основная часть металла должна быть извлечена во время первичной обработки шлака, а оставшаяся — магнитными сепараторами, установленными перед дробилками.

Простая схема была реализована на заводе «Фест» в Линце (Австрия), где частично разрушенные термоударным способом шлаки измельчают на щековой дробилке до крупности 0–100 мм. Перед дроблением и после него проводят магнитную сепарацию. Такой способ позволял извлечь металл в количестве 10% от массы шлака.

По данным английских исследователей, немагнитную часть сталеплавильных шлаков можно использовать без ограничения в качестве железнодорожного балласта, в основаниях дорог, обочин, тротуаров.

В Великобритании в 1960-х гг. запущен в эксплуатацию полностью автоматизированный завод, выпускающий 120–160 т/ч щебня из сталеплавильных шлаков, а также разные виды дорожных материалов. Завод обслуживают 2 оператора: один с помощью электронной системы управляет процессом, второй следит за производством щебня.

В Японии компания «Кавасаки стил» в 1970-х гг. запущено производство по переработке сталеплавильных шлаков с получением балласта и удобрений.

Среди специализированных шлакоперерабатывающих предприятий представляет интерес завод в Техасе, запущенный в конце 1960-х гг., на котором перерабатываются доменный, конвертерный и электросталеплавильный шлаки и выпускается 5 фракций доменного шлака и 3 фракции сталеплавильных шлаков, которые используются в качестве железнодорожного балласта и в дорожном строительстве.

Щебень из сталеплавильных шлаков является полноценным заменителем гранитного щебня, и стоимость его в 2–3 раза ниже стоимости щебня из горных пород. Используется шлаковый щебень в строительстве железных и автомобильных дорог, в общестроительных работах и в качестве сырья для производства цемента.

Наиболее широко применяется шлаковый щебень в строительстве автомобильных дорог для устройства оснований дорожных одежд. Особой популярностью у дорожников пользуется крупный щебень 40–70 мм. Установлено, что при строительстве 1 км дороги шириной 7 м необходимо использовать 5000–6000 т щебня и песка. Под строительство такого же участка дороги шлака используется 700–800 т.

Конвертерный шлаковый щебень характеризуется способностью схватываться без доступа воздуха, зерна связываются друг с другом путем формирования гидратов, и при этом постепенно повышается предел прочности при сжатии. Предел прочности на сжатие у конвертерного шлака незначительно ниже по сравнению с данной характеристикой природного материала. Увеличивает предел прочности на сжатие добавка доменного шлака в количестве до 25%.

Кроме дорожных одежд, щебень можно успешно применять в составе асфальтобетонного покрытия. Шлаковые асфальтобетонные покрытия отличаются высокой сдвигоустойчивостью, водо- и морозостойкостью, долговечностью и стабильными фрикционными свойствами в процессе эксплуатации. С введением в асфальтобетон шлаковых материалов коэффициент сцепления колеса с покрытием значительно увеличивается. Большой опыт применения конвертерного шлака в составе асфальтобетонных покрытий дорог наработан в США и Великобритании. Промышленные испытания показали, что шлаковые смеси обладают значительным сопротивлением износу поверхностей и антискользким действием аналогично базальтовым покрытиям. Особенностью асфальтобетонных покрытий, изготовленных с применением сталеплавильных шлаков, является отсутствие деформации сдвига даже при интенсивном движении тяжелого транспорта.

Конвертерный шлаковый щебень является отличным путевым балластом на железных дорогах. Этому способствует его высокая износостойкость и сопротивление истиранию, высокое электрическое сопротивление, чем обеспечивается отсутствие помех для проводимости рельсов. Высокая удельная масса и угловатая форма кусков конвертерного щебня обеспечивает высокое сопротивление боковому смещению на кривом пути. Высокая пористость обеспечивает хороший дренаж ливневых вод.

В общестроительных работах шлаковый щебень используется при изготовлении бетонных изделий. При изготовлении бетона конвертерные шлаки могут использоваться как в качестве одного из компонентов вяжущего, так и в качестве крупного или мелкого заполнителя. Щебень из конвертерных шлаков является эффективным крупным заполнителем для бетонов вместо дорогостоящих природных материалов — андезита, базальта, диабазы. Механическая прочность шлакового щебня на 70–80% выше, чем прочность природных материалов. Кроме того, более интенсивное взаимодействие на границе шлакового щебня с цементными фазами снижает расход вяжущего примерно на 10% по сравнению с использованием природного, например, гранитного щебня. Многочисленными исследованиями доказано, что цемент, полученный с добавкой конвертерного шлака в сырьевую смесь, имеет более высокую начальную прочность. Так, в Польше получен шлаковый цемент с повышенной прочностью, составной частью сырьевых материалов которого является смесь шлаков: гранулированный доменный шлак (около 2 частей) и конвертерный шлак (1 часть).

В Китае основное внимание уделяется использованию сталеплавильного шлака в качестве сырья для производства цемента. Для производства цемента используются в составе сырьевых компонентов 35–45% доменного и 35–45% конвертерного шлака. Производство 1 т цемента из шлака позволяет сэкономить около 10 кВт·ч электроэнергии и 25 кг угля по сравнению с производством обычного портландцемента. Для цемента, изготовленного из сталеплавильного шлака, не характерны быстрое схватывание и ранние прочностные свойства (быстрое твердение). Цемент характеризуется низкой теплотой гидратации, малым тепловым расширением, хорошей непроницаемостью, хорошим сопротивлением истиранию, поэтому может быть использован при строительстве плотин, бетонных конструкций электростанций. Цемент на основе сталеплавильных шлаков широко используется в гражданском строительстве при строительстве высотных зданий, при создании фундамента, колонн с балками, плит перекрытия, лестниц, больших стеновых панелей, для создания бетонного покрытия шоссе и взлетно-посадочных полос в аэропортах, при производстве железобетонных шпал для железных дорог и т. п.

В Европе отмечено существенное использование сталеплавильных конвертерных шлаков в качестве удобрений. Например, в Германии в качестве удобрений используется около 20% шлаков.

Из сталеплавильных шлаков производят шлако-фосфорные и шлако-известковые удобрения для сельского хозяйства. Пригодность шлака к применению в качестве удобрения объясняется тем обстоятельством, что он содержит значительное количество оксида кальция при относительно меньшей доле оксида кремния. Это делает возможным использовать его для известкования кислых почв взамен извести. Наличие в нем марганца, железа, кремния, алюминия и других элементов повышает его ценность в сравнении с известью, т. к. эти соединения в качестве микроэлементов необходимы для развития растений. Шлаки, содержащие оксид кальция до 52% и оксид магния до 10–12%, в результате силикатного распада на воздухе превращаются в тонкий порошок и вносятся в почву без помола.

Фосфатные шлаки, полученные при переделе фосфористых чугунов на сталь, являются фосфорным удобрением типа суперфосфата. Впервые в этом качестве стали использовать мартеновские шлаки комбината «Азовсталь», содержащие 10–12% P_2O_5 . Шлакопомольное отделение работает с 1955 г. на немецком оборудовании. Шлаковую муку получали также на НЛМК и заводе «Амурсталь». На конвертерных фосфатшлаках Карагандинского меткомбината отработана технология получения гранул фосфатшлаковых удобрений на водной основе с необходимыми для растений солевыми добавками. Технология выгодно отличается от известных зарубежных аналогов и позволяет получать гранулы, близкие по форме к сферическим с минимальным разбегом по крупности. Гранулированные металлургические удобрения не пылят при перевозках, пересыпках и внесении в почву.

При переработке сталеплавильных шлаков особенно большое значение придается повышению эффективности извлечения из шлаков железа. Для извлечения железа из металлургических шлаков традиционно используют магнитную и электромагнитную сепарацию. Если при переработке доменных шлаков в извлечении железа нет необходимости ввиду его низкого содержания (менее 1%), то при переработке сталеплавильных шлаков эта технологическая операция является обязательной, так как содержание железа в них является значительным (более 10%). В настоящее время наиболее перспективными для извлечения металла из шлаков являются магнитные сепараторы (железоотделители) с электромагнитами, что обусловлено их способностью создавать магнитные поля высокой напряженности в значительных рабочих объемах. Такие сепараторы выпускают многие зарубежные фирмы, в основном США и Германии. Наиболее широко применяют подвесные электромагнитные сепараторы: извлекающие или саморазгружающиеся. Основные изготовители: США — «Эриз мэньюфекчуриг», «Стернз Магнетик», «Дингз» и др.; Германия — «Штайнерт», «Швермашиненбау», «Крупп» и др.; Япония — «Канецу Когойо»; Франция — ПИК, ИФЕ; Великобритания — «Виттонкет и Юнимаг».

Одним из первых заводов, перешедшим на полную переработку шлаков сталеплавильного производства, в СССР был Днепропетровский завод им. Петровского. На заводе были введены в эксплуатацию две установки для магнитной сепарации металла и получения щебня: одна — для переработки мартеновского шлака, другая — конвертерного общей мощностью 250 тыс. т в год.

В настоящее время в России сталеплавильные шлаки перерабатываются на ряде металлургических предприятий.

В 1994 г. на Магнитогорском меткомбинате для переработки текущих конвертерных и мартеновских шлаков была пущена в эксплуатацию стационарная установка АО «Хеккет Мультисерв Россия» производительностью 2,0–2,2 млн т в год и 2 передвижные установки SKI (Финляндия) для переработки текущих и отвальных мартеновских шлаков. Стационарная установка включает 5 стадий грохочения, 3 стадии сухой магнитной сепарации и 1 стадию самоизмельчения. Передвижные установки состоят из двух агрегатов: один предназначен для классификации шлака по фракциям и выделения из него магнитного продукта, второй — только для отделения магнитного продукта.

Получаемый магнитный продукт фракции 0–10 мм ($Fe = 36–40\%$), 0–15 мм, 10–50 мм ($Fe = 66–75\%$) используется в агломерационном и доменном производствах в качестве металлосодержащего компонента в количестве 35,6 кг/т агломерата и 2–12 кг/т чугуна. Скрап фракции 50–350 мм применяют в металлошихте конвертерной плавки (10–15% от массы металлолома). Фракционированный щебень отгружается потребителям.

На Нижнетагильском металлургическом комбинате в сентябре 1996 г. введен в действие цех переработки техногенных образований (ЦПТО), построенный по технологии фирмы Э. Фридриха (Германия). Оборудование поставлено германской фирмой «Клекнер-Хумбольдт-Дойц» (КХД), проект выполнен КХД-НТМК. Это крупнейшее в Европе предприятие по переработке шлаков производительностью 3,1 млн т в год. Технологическая схема включает участок буровых работ, два участка экскаваторного извлечения крупного металла, дробильно-сортировочную установку и установку по обогащению и сортировке железосодержащего материала. Переработка отвального шлака производится по следующей схеме. На участке экскаваторной разработки отвалов извлекается крупный металл, который по мере накопления отправляется в копровый цех. Извлечение крупного металла производится также и при загрузке шлака в бункер дробильно-сортировочной установки на колосниковой решетке с размером ячейки 300 мм. Прошедший через решетку материал питателем равномерно подается в галтовочный барабан с продольными полками, где куски шлака частично разрушаются с выделением металлических включений. Затем вся масса материала пропускается через магнитный барабан. После барабана немагнитная часть отправляется на дробильно-сортировочную установку для переработки в щебень и песок, а магнитная на двух последовательно расположенных грохотах разделяется на фракции. Продукция цеха: щебень фракции 0–10, 10–20, 20–40, 40–70 мм; металлопродукт фракции 0–10, 10–40, 40–70, 70–120, более 120 мм; шлакометаллическая смесь (ШМС) фракции 0–10 мм, огнеупорный лом (шамотный и магнезиальный). Годовое производство металлопродукции составляет 425 тыс. т, в том числе:

- 35 тыс. т металлопродукта 0–10 мм, $Fe = 35–70\%$, реализуется аглофабрикам;
- 40 тыс. т металлопродукта 10–120 мм, $Fe = 59–87\%$, используется в шихте доменных печей (18 кг/т чугуна);
- 120 тыс. т металлопродукта более 120 мм, $Fe = 75–95\%$, используется в шихте мартеновских печей;
- 230 тыс. т ШМС 0–10 мм, $Fe = 22–35\%$, реализуется аглофабрикам (100 кг/т стали).

В последние годы на металлургических предприятиях России, Украины, Белоруссии, Грузии широко используются установки, производимые компанией Amcom LLC. Компания Amcom LLC была основана в 1996 г. в Нью-Йорке, США. В предлагаемой технологии

переработки сталеплавильных шлаков используется метод магнитной сепарации с применением принудительной очистки лома в дробильных устройствах. Налажено производство мобильных и стационарных установок по переработке шлака с производительностью до 375 т/ч, позволяющих получать фракционированный щебень, огнеупоры, лом черных и цветных металлов.

Комплексы по переработке сталеплавильных шлаков компании Amcom LLC включают магнитные сепараторы, галтовочные барабаны, барабанные и двухъярусные грохоты, вибрационные питатели, систему конвейеров.

За период с 2000 по 2018 г. было спроектировано и внедрено в эксплуатацию восемнадцать комплексов по переработке отходов металлургического производства производительностью от 150 до 375 т/ч и ассортиментом конечного продукта:

- НЛМК, конвертерный шлак (2016 г.), 350 т/ч. Продукция: щебень фракционированный крупностью 0–10, 10–20, 20–40, 40–70 мм; металлопродукт крупностью 0–10, 10–100, 100–300, +300 мм;
- ЕВРАЗ ЗСМК, конвертерный шлак (2014 г.), 240 т/ч. Продукция: щебень крупностью 0–250 мм; металлопродукт 0–10, 10–80, 80–250, +250 мм;
- Белоруссия, Гомель (2013 г.), электросталеплавильный шлак, 300 т/ч. Продукция: щебень фракционированный крупностью 0–10, 10–60, 60–250 мм; металлопродукт 0–10, 10–60, 60–250, +250 мм;
- ММК, 375 т/ч, отвальные шлаки мартеновского и конвертерного производств (2009–2010 гг.). Продукция: щебень фракционированный 0–10, 10–60, 60–250 мм; металлопродукт 0–10, 10–60, 60–250, +250 мм;
- Азовсталь, Украина, 300 т/ч (2002–2004 гг.), отвальный мартеновский и конвертерный шлак. Продукция: щебень фракционированный 0–10, 10–60, 60–250 мм; металлопродукт 0–10, 10–60, 60–250, +250 мм;
- ДМЗ, Украина (2007 г.), 250 т/ч, отвальные шлаки мартеновского и электросталеплавильного производств. Продукция: щебень фракционированный 0–10, 10–60, 60–250 мм; металлопродукт 0–10, 10–60, 60–250, +250 мм;
- Руставский метзавод, Грузия (2008 г.), 300 т/ч, мартеновские и конвертерные шлаки. Продукция: щебень фракционированный 0–10, 10–60, 60–250 мм; металлопродукт 0–10, 10–60, 60–250, +250 мм.

Технологии переработки металлургических пылей и шламов

Уровень переработки железосодержащих пылей в странах Европы составляет в среднем около 70%, при этом в некоторых европейских странах (Бельгия) достигает 100%. На всех металлургических заводах Японии коэффициент оборотного использования металлургической пыли также близок к 100%.

В отличие от металлургических шлаков, переработка которых организована на большинстве металлургических заводов, промышленная переработка мелкодисперсных металлургических отходов в России не имеет широкого распространения. На большинстве металлургических заводов традиционно утилизируют агломерационные шламы, для обезвоживания которых построены комплексы обезвоживания, а также перерабатывают на аглофабриках пыль газоочисток доменных печей (колошниковая пыль). Сталеплавильные шламы утилизируют на Новолипецком и Челябинском заводах, доменные шламы в промышленном масштабе не перерабатываются.

Основным методом использования железосодержащих металлургических пылей и шламов (агломерационные, доменные, конвертерные и др.) в мире является их добавка к агломерационной шихте в количестве до 10–15% (по массе) шихты при сохранении прочности агломерата и производительности агломашин.

Основные требования к металлургическим пылям для их утилизации в агломерации:

- суммарное содержание полезных компонентов — железа, углерода и оксидов кальция при утилизации в аглошихте — не менее 45%;
- концентрация цинка при использовании на аглофабриках — не более 1%;
- влажность при использовании в аглошихте — не выше 8–9%, в отдельных случаях — не более 12%;
- максимальный размер комков при использовании в аглошихте — 6 мм;
- при использовании в аглошихте — хорошая слипаемость.

Основными критериями пригодности железосодержащих отходов к применению в аглопроизводстве являются также их сыпучесть, транспортабельность, возможность дозирования и перегрузок в технологическом цикле аглофабрики, способность равномерно распределяться в массе аглошихты.

Пыли металлургического производства обычно не требуют какой-либо предварительной подготовки перед утилизацией. Шламы, прежде чем их использовать (например, в качестве компонента шихты), необходимо подвергнуть обезвоживанию (сгущению, фильтрованию, сушке).

На зарубежных предприятиях железосодержащие пыли и шламы перерабатываются большей частью в аглопроизводстве, а также в доменном и конвертерном производствах только в подготовленном виде, главным образом в виде безобжиговых окатышей или брикетов. Для возврата отходов в агломерацию получают окатыши небольшого размера, диаметром 2–3 мм. Примеры такой технологии: заводы в Бейлихеме и Спарроус-Пойнте, США; завод компании «Эстель Хюттенверке» в Дортмунде, Германия; заводы компании «Крупп», Германия; компаний «Кавасаки Сэйтэцу» и «Кавасаки Дзэкоге», Япония; «Фос-сюр-Мор», Франция и многие другие. В качестве связующего используют главным образом известь с получением окатышей влажностью 7–12%.

Сталелитейная компания «Сидерар» (Аргентина) создала установку для гомогенизации твердых отходов, которые затем используются в аглошихте в количестве 300 кг на 1 т агломерата. Установка агрегата для гомогенизации позволила обеспечить утилизацию 10–12 видов твердых отходов (отсевы сырья из-под бункеров шихтоподачи, шлаки и шламы конвертерного производства, шламы и рудная мелочь аглодоменного производства, колошниковая пыль, прокатная окалина и др.), причем на агрегате получают однородный материал со стабильным химическим составом.

Технологии окомкования металлургических пылей в безобжиговые окатыши на связке широко применяются в Японии с конца 1960-х — начала 1970-х гг. На ряде металлургических предприятий Японии работают промышленные установки по подготовке пылей и шламов для ввода их в аглошихту. В качестве шихтовых материалов в производстве агломерата используют шламы, прокатную окалину, пыль аглофабрик, известковую пыль и др. На заводах компаний «Син Ниппон Сэйтэцу» и «Ниппон кокан» работают промышленные установки (1000 т/мес.) для окомкования конвертерной пыли с получением гранул с содержанием 60% Fe, которые после упрочнения вводят в аглошихту.

Средние затраты на производство сырых окатышей из конвертерных шламов по 25 предприятиям США и Канады составляют 36,5 долл./т, что более, чем в 2 раза меньше, чем затраты на их складирование в отвалах (85–90 долл./т).

Металлургические пыли и шламы содержат железо главным образом в оксидной форме (FeO , Fe_2O_3). Восстановление железа из оксидов может происходить в доменной печи, где перерабатываются агломерат или окатыши, либо в отдельных восстановительных агрегатах, куда пылевидные отходы загружаются в окускованном виде в форме окатышей или брикетов. При восстановлении железа происходит одновременное восстановление содержащихся в отходах цветных металлов, в частности цинка и свинца.

Цинксодержащие пыли не могут быть направлены в агломерационное производство, так как при попадании агломерата в доменную печь возгонка цинка приводит к образованию

настывает при его конденсации как в верхних горизонтах доменной печи, так и в системе отвода и очистки технологического газа. Содержание цинка в доменных шламах обусловлено его концентрацией в агломерате, в конвертерной и электросталеплавильной пыли — переработкой лома оцинкованных изделий (кузова автомобилей, строительные конструкции). В высокотемпературных металлургических агрегатах цинк возгоняется и затем конденсируется в системе газоочистки, концентрируясь в уловленной пыли, концентрация цинка в электросталеплавильной пыли может достигать 40%.

В США мелкодисперсные отходы доменного производства: сухие пыли (390 тыс. т/год) с содержанием железа 10–35% и углерода 30–75% и шламы (650 тыс. т/год) с содержанием железа 10–48% и углерода 20–65% используются в агломерационном производстве или в брикетированном виде возвращаются в доменный передел. Конвертерные (1,21 млн т/год) шламы с содержанием железа 50–63% и электросталеплавильные (850 тыс. т/год) пыли с содержанием железа 20–40% используются после извлечения из них цинка.

Большое распространение получило производство металлизированных окатышей с использованием в качестве восстановителя угля во вращающихся (трубчатых) печах. Отличаются они в основном технологией подготовки исходных материалов. В последние годы на таких установках вместе с вращающейся печью работает устройство типа аглоленты, на которой осуществляются сушка и предварительный нагрев окатышей теплом газов, отходящих из трубчатой печи: решетка — трубчатая печь. Готовые окатыши используют в качестве вторичного сырья при выплавке стали в конвертерах.

Исследования в области утилизации мелкодисперсных металлургических отходов начались за рубежом в конце 50-х гг. XX в. В 1963 г. компанией «Крупп» (ФРГ) была создана опытно-промышленная установка по переработке доменных шламов, включающая систему обезвоживания отходов (фильтрация — сушка), окомкование в тарельчатых грануляторах без добавления связующих веществ, вращающуюся трубчатую печь для восстановления окатышей длиной 14 м при температуре 1050°С и аппаратуру для улавливания возгонов цинка и свинца. В качестве восстановителя использовался лигнит, получаемый продукт — металлизированные окатыши, степень металлизации — 92–95%, степень улавливания возгонов цинка и свинца — 98–99%, а в уловленных возгонах их содержание составляло около 45%. Упрочненные при обжиге металлизированные окатыши содержали около 70% железа и использовались при выплавке чугуна и частично — стали. Эта технология использовалась компанией «Лурги» с 1975 г., которая в результате промышленных экспериментов создала промышленную установку для переработки 400 тыс. т в год Fe-содержащих доменных и конвертерных пылей и шламов с использованием вращающейся печи длиной 70 м и диаметром 6 м.

Процессы производства металлизированных окатышей из доменных и сталеплавильных шламов и пылей были разработаны компаниями «Кавасаки сэйтэцу», «Сумитомо киндзоку коге» (Япония) и «Лурги» (Германия). Общим этих процессов является использование в качестве восстановительного агрегата вращающейся (трубчатой) печи, различия заключаются в подготовке шихтовых материалов.

Компания «Кавасаки сэйтэцу» построила промышленную установку производительностью более 240 тыс. т металлизированных окатышей в год из доменных и конвертерных шламов. Отличительной особенностью разработанной технологии является окомкование Fe-содержащих отходов без связующих, роль которых выполняет конвертерная пыль. В качестве восстановителя использована коксовая мелочь. После окомкователя сырые окатыши поступают на решетку (конвейерная машина), где они высушиваются и подогреваются дымовыми газами, отходящими от трубчатой печи, отапливаемой мазутом. Затем окатыши загружаются вместе с коксовой мелочью в печь, где восстанавливаются. Восстановленные окатыши из печи направляются в барабанный охладитель, а затем на виброгрохот и в магнитный сепаратор. Степень металлизации составила около 95%, содержание металлического железа в продукте составляло более 70%, степень извлечения цинка, свинца и соединений щелочных металлов достигала 99%.

Аналогичные установки построены на заводах «Сумитомо киндзоку коге» по способам Dust Reduction и SPM (Sumitomo Prereduction Method) производительностью 20 и 18 тыс. т металлургических пылей в месяц соответственно. На этих установках осуществляют окускование пылей и шламов во время их восстановления во вращающихся трубчатых печах длиной 80 м с использованием в шихте мелкого антрацита или коксика, 0,5–1% бентонита в качестве связующего. Сырые окатыши подвергают предварительному подогреву до 250°С в целях упрочнения и затем прокаливают во вращающейся печи при 1050–1150°С, степень удаления цинка — 90–96,4%, степень металлизации продукта — 88,8%, окатыши используются в доменных печах.

На одном из металлургических заводов компании «Ниппон Кокан» работает промышленная установка (350 тыс. т в год) для утилизации различных пылей и шламов по технологии СЛ-РН с использованием в качестве восстановителя угля.

Все образующиеся на металлургическом заводе Fe-содержащие отходы высушивают, смешивают (оптимально: по 30% доменного шлама и конвертерной пыли, 40% тонкоизмельченной железной руды), подвергают совместному измельчению в шаровых мельницах и последующему окомкованию с добавкой бентонита на трех тарельчатых грануляторах диаметром 6 м. Сырые окатыши направляются в конвейерную обжиговую машину длиной 62 м, где они сушатся, упрочняются и частично восстанавливаются углеродом, содержащимся в доменном шламе. Горячие окатыши и уголь-восстановитель с высоким выходом летучих веществ подвергают восстановительному обжигу во вращающейся печи длиной 70 м. Получаемым продуктом является губчатое железо с содержанием железа до 95%, которое затем используется в шихте доменных печей. В процессе восстановления из шихты удаляется до 95% цинка.

Распространенным способом окускования мелкодисперсных материалов является брикетирование, позволяющее путем прессования получать прочные куски одинакового размера, формы и массы. Кроме того, процесс брикетирования позволяет вводить в состав брикетов полезные добавки, улучшающие показатели технологических процессов. Влажность брикетируемой шихты может достигать более высокого уровня, что особенно актуально для переработки шламов.

Одно из первых предприятий по брикетированию металлургических отходов (колошниковая пыль и др.) было запущено в ФРГ еще в начале 1960-х гг.

Брикетиrowание осуществлялось на вальцевых прессах производительностью 10–15 т/ч с использованием в качестве связующего 50%-ного сульфитного щелока, полученные брикеты обжигались при 600–900°С в атмосфере $\text{CO}:\text{CO}_2 = 3:1$ и использовались для выплавки чугуна.

Компания «Аугуст Тиссен-Хютте» (Германия) разработала и реализовала в промышленном масштабе метод брикетирования Fe-содержащих пылей и шламов в смеси с угольной пылью и связующим, которые при условии незначительного содержания цинка, свинца и щелочей (K, Na) используются в металлургическом переделе.

В конце 1970-х гг. образование мелкодисперсных отходов в металлургии США составляло около 6 млн т/год. Для их брикетирования был разработан процесс Ferro-Carb, обеспечивающий утилизацию всех Fe- и углеродсодержащих пылей, очищенных от цинка, путем изготовления брикетов для доменного производства. Технология включала 4 основные стадии: сухое смешивание Fe- и углеродсодержащих пылей в любом соотношении, нагрев шихты с введением расплавленного (или разогретого) связующего и перемешивание, брикетирование на вальцевых прессах, нагрев брикетов в окислительной среде для дегидратации и полимеризации связующего. Готовые брикеты обладали высокой механической прочностью (86–500 кг/брикет), водо- и термостойкостью и использовались в доменном производстве. По мнению производителя, эта технология характеризуется значительно меньшими капитальными и эксплуатационными затратами по сравнению с другими способами получения окускованного сырья.

Компания FERCO на заводе в Ривер Руж (шт. Мичиган) с 1988 г. производит брикеты для доменного производства на основе отходов металлургических производств следующего химического состава (в среднем): 61% Fe, 11% C, 7% CaO, 4% SiO₂, 2% Al₂O₃. В результате многочисленных исследований установлено, что при замене в шихте доменной печи 5% офлюсованных окатышей комплексными брикетами расход кокса уменьшился на 18 кг, производительность печи повысилась на 5% на 1 т чугуна.

Компания «Крупп» (Германия) по соглашению с компанией «Хеккет Инжиниринг» (США) эксплуатирует промышленное предприятие по брикетированию различных отходов — от мелочи рудных окатышей до высоковлажных шламов мокрой газоочистки производительностью 400 тыс. т/год. Металлизированные брикеты используются в сталеплавильном и литейном производствах.

Компания SSAB Mercox AB (Швеция), являющаяся дочерним предприятием SSAB Oxelosund и SSAB Tunnpilat, с 1993 г. специализируется на переработке побочных продуктов металлургического производства и осуществляет производство брикетов из отходов по традиционной технологии производства бетонных блоков. Металлопродукт крупностью 0–8 мм смешивается с другими металлосодержащими отходами: прокатная окалина, несколько видов пыли и шлам кислородно-конвертерного процесса. В качестве связующего используется портландцемент. Материал поступает в пресс-форму, под которую предварительно помещен деревянный поддон, подвергается виброуплотнению при одновременном приложении невысокого давления прессования. Брикеты производятся шестиугольной формы 60 × 60 мм, вес 500 г. После 24-часовой выдержки в камере брикеты хранятся на открытой площадке приблизительно в течение 3 недель, после чего используются в доменных печах и конвертерах.

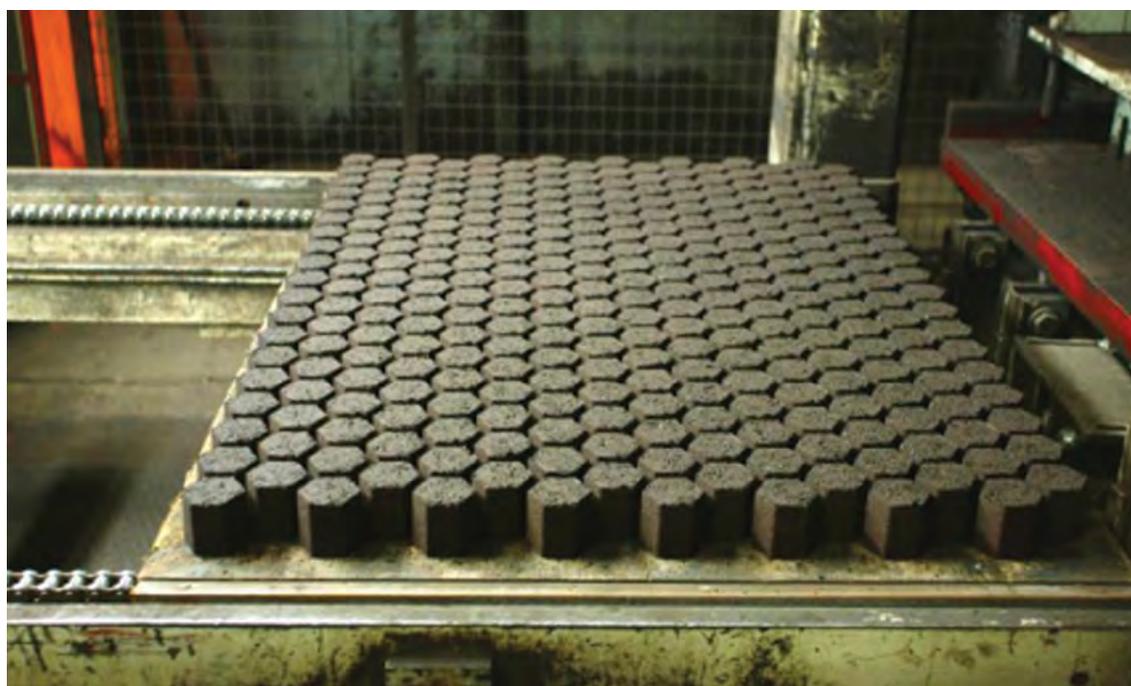


Рис. 18.4. Брикеты, производимые компанией SSAB, на заводе в Лулео (Швеция)

В 1986 г. начато производство брикетированного сырья для доменных печей. В период с 1991 по 1996 г. на открытой площадке произведено 230 тыс. т брикетов из пылей и шламов. В 1998 г. в доменном производстве переработано 110 тыс. т брикетов, что соответствует 75 кг/т чугуна, или 4% общей массы доменной шихты.

В конце 1950-х гг. в США появились первые установки по горячему брикетированию Fe-содержащих отходов. Их производительность составляла 5 т/ч. В 1966 г. на одном из заводов компании «Грей айрон фаундри» была пущена в эксплуатацию установка

производительностью 30 т/ч. Аналогичная установка для утилизации Fe-содержащих пылей и шламов (доменная пыль, прокатная окалина, тонкоизмельченный металллом) с 1966 г. работала на заводе компании «Доминион фаундри энд стил». Нагрев шихты производили в печах кипящего слоя при 800–1000°С, затем ее брикетировали на вальцевых прессах.

Компания «Дофаско» разработала технологию, предусматривающую ввод в состав шихты из Fe-содержащих отходов колошниковой пыли, содержащей углерод, или углеродистого восстановителя для более быстрого восстановления сырья при последующем переделе; это позволило также снизить температуру нагрева шихты. По этой технологии в США работало несколько промышленных установок производительностью 5 т/ч. Промышленная установка с большей производительностью (65 тыс. т/год) по брикетированию Fe-содержащих отходов эксплуатируется на заводе компании «Люкене стил» в г. Котсвилле, брикеты используются в дуговых электропечах. Затраты составили около 1 млн долл.

Компании «Фест-Альпине» (Австрия) и «Тиссен» (Германия) производят брикеты из конвертерной пыли, уловленной в сухих электрофильтрах, методом горячего брикетирования. Брикеты из пыли возвращаются в сталеплавильный процесс, где используются в качестве охладителя при повышенной доле чугуна в шихте. На заводе «Фест-Альпине» в Линце внедрен замкнутый процесс переработки пыли.

На выходной стороне обычной системы отвода конвертерного газа находится сухой электрофильтр. Содержание в пыли цинка контролируется оптическим лазерным измерителем. Если это содержание превышает 20%, то включается система разгрузки и обогащенная цинком пыль выгружается из системы. Из системы таким способом выводится 4% пыли, которая также находит сбыт. Остальная масса пыли подвергается брикетированию и непрерывно повторно используется в конвертерном процессе. Так как 90% всех действующих конвертеров не оборудованы системой сухого пылеулавливания, разработана схема обогащения цинкосодержащей пыли применительно к мокрому пылеулавливанию. Обогащение до 20%-ного содержания цинка осуществляется путем отдельного сбора пыли, образующейся в первые 4–5 мин конвертерной продувки, когда шихта теряет основную массу присутствующего в ней цинка и свинца.

В Японии эксплуатируется несколько установок брикетирования железосодержащих отходов. Компания «Ниссен сэйко» кек после фильтр-прессов для обезвоживания шламов с исходной влажностью 98% и сушки в барабанных сушилках смешивают с окалиной и пылью из систем газоочистки, затем брикетируют со связующими на вальцевых прессах. Сырые брикеты упрочняют и подсушивают до влажности 2% в сушилках конвейерного типа. Ввод в брикетируемую шихту крупных частиц прокатной окалины в количестве до 30% способствует повышению прочности брикетов. Готовые брикеты используют в шихте электропечей. Цинк, содержащийся в брикетах, испаряется в плавильной электропечи и улавливается тканевым фильтром в виде оксидов. Содержание цинка в уловленной пыли составляет 10–20%, и она используется как сырье для производства цинка.

Установка на базе печи с вращающимся подом компании Lucchini (Италия) спроектирована для ежегодной обработки около 60 тыс. т железосодержащих отходов (сухая масса).

Установка успешно функционирует в качестве агрегата предварительного восстановления нового процесса получения чугуна Redsmelt NST. Основной шихтовой материал представляет собой смесь пыли доменного и конвертерного производств, из которой производят самовосстанавливаемые окатыши, т. е. окатыши, в которых содержится достаточно углерода из доменной пыли для полного восстановления содержащегося железа без дополнительного ввода угля. На установке производится металлизированный продукт в виде горячебрикетированного железа, которое используется в доменном производстве. Загрузка в доменную печь горячебрикетированного железа позволяет получить следующим результат:

- сэкономить около 1,1 т коммерческих окатышей;
- уменьшить примерно на 250 кг расход кокса;
- увеличить на 0,5 т объем производства чугуна.

Доменные и сталеплавильные пыли и шламы представляют собой сырьевой источник для получения не только черных, но и цветных металлов. Однако в настоящее время в мире перерабатывается только 45–50% цинксодержащих металлургических пылей. Для получения продукта, пригодного для дальнейшей переработки на предприятиях цветной металлургии, необходимо предварительное обогащение пылей и шламов цинком и другими цветными металлами до таких концентраций, которые требуются для экономической переработки известными способами утилизации.

В настоящее время известно множество технологий извлечения цинка из доменных и сталеплавильных пылей и шламов, которые можно подразделить на следующие группы:

- механические (гидроциклоны, обдирка);
- гидрометаллургические (выщелачивание);
- пирометаллургические;
- плазменные;
- процессы жидкофазного восстановления.

Довольно распространена обработка пылей и шламов перед использованием в аглошихте в гидроциклонах, обеспечивающая концентрацию цинка в верхнем продукте, существенно уменьшая количество цинка, поступающего в доменную печь.

Разработка фирмы British Steel предусматривает обработку в гидроциклоне колошниковой пыли. После экспериментов на полупромышленной установке на заводе в Скаторпе в декабре 1993 г. была введена в эксплуатацию промышленная установка на заводе в Ллоуэрне, а в апреле 1994 г. — в Тиссайде.

Разработка японской фирмы Rasa Corp. (способ DeZn) включает классификацию в вакуумном гидроциклоне доменного шлама. Для переработки пылей и шламов с высоким содержанием цинка японской компанией «Раса Коге» разработан процесс «Раса-НГП» с использованием гидроциклона и специального агрегата для снятия (обдирки) поверхностного слоя, в котором концентрируется цинк и другие примеси. Установки конструкции «Раса Коге» позволяют осуществлять обдирку поверхностного слоя пыли, где преимущественно сосредоточены соединения цинка и свинца, с помощью скальпирующего аппарата «Вольтекс» и последующую высокоэффективную классификацию шлама в гидроциклоне особой конструкции (гидронегаклоне). Гидроциклон отличается наличием насоса, создающего вакуум в аппарате. В процессе классификации тонкодисперсные частицы, содержащие 80% цинка, уходят со сливом, а в осадке, составляющем 75–80% (по массе) твердого вещества, остается продукт с низким содержанием цинка. Капитальные и эксплуатационные затраты на подготовку шлама в этом случае в 10–15 раз ниже, чем при получении из отходов металлургических окатышей. К 1990 г. в Японии было построено 6 таких установок производительностью по сырью 120 тыс. т/год каждая («Ниппон стил», «Ниппон кокан» и др.).

При использовании механических способов степень извлечения цинка на 10–15% меньше, чем при применении пирометаллургических, однако реализация первых значительно дешевле, а установки проще в эксплуатации, и их реализацию производят на серийно выпускаемом оборудовании.

В течение последних 30 лет многочисленные технологические разработки, основанные на гидро- и пирометаллургических принципах, были основными в этой области.

Гидрометаллургические методы основаны на выщелачивании цинка, свинца и других цветных металлов растворами кислот или щелочей и последующем их осаждении химическими или электрохимическими методами. Переработка цинксодержащей пыли методами гидрометаллургии реализована на некоторых заводах Италии и США. Однако гидрометаллургические методы оказались неэффективными, т. к. не позволяют извлечь цинк из труднорастворимого феррита цинка — наиболее распространенного соединения цинка в металлургических пылях.

Альтернативным процессом является пирометаллургический метод, основанный на карботермическом восстановлении. Пирометаллургические технологии позволили создать и опробовать различные процессы в пилотном и промышленном масштабе.

Доминирующим процессом в настоящее время является переработка в вельц-печи (Waelz), используемая в мире с 1970-х гг. Технология Waelz в настоящее время рассматривается как наилучшая доступная технология на ближайшие 25 лет. Вельц-процессы используются в США, Европе, Юго-Восточной Азии (Тайланд) и на Ближнем Востоке (Саудовская Аравия). Только один завод GSD в Таиланде может переработать до 110 000 т в год стале-плавильной пыли и произвести до 40 000 т в год оксида цинка. Впервые в РФ проведена промышленная переработка пыли ЭДП ОАО «Северсталь» с использованием вельц-печи большой мощности (более 350 т/сут.). Испытания подтвердили эффективность использования для этой цели вельц-процесса как экологичной и надежной технологии переработки различных видов отходов и промпродуктов черной и цветной металлургии.

В основе процесса лежит восстановление цинка, кадмия и свинца из предварительно окомкованной шихты (60%), а также коксовой мелочи (25%) и флюса SiO_2 (15%). Шихта загружается во вращающуюся трубчатую печь, где выдерживается 4 часа при температуре 1200°С. Возгоняясь, пары цинка и других ценных компонентов удаляются из печи вместе с отходящими газами. При охлаждении отходящих газов происходит конденсация паров металлов в виде мелкодисперсной пыли. Попадая в систему газоочистки, пыль улавливается в фильтрах и представляет собой сырой оксид цинка (50–60% Zn), или «вельц-оксид».

Полученный продукт направляется в цинковое производство, а шлак используется в качестве строительного материала или при строительстве дорог.

Преимущества вельц-процесса:

- низкое энергопотребление;
- хорошо отработанная и оптимизированная технология;
- простота технологического процесса в одну ступень.

Недостатки:

- низкое качество продукта («грязный» оксид цинка), который может быть использован только как заменитель руды в первичной металлургии цинка;
- большое количество вновь образующихся отходов (около 700–800 кг/т загруженной пыли);
- извлечение только одного ценного металла.

При высоком содержании в отходах свинца Pb (до 1–2%) и цинка Zn (4–7%) на целом ряде предприятий за рубежом проблему их утилизации решили путем получения металлизированных окатышей. Технологический процесс их получения включает окомкование отходов в чашевых окомкователях, сушку и подогрев отходящими газами, последующую металлизацию во вращающихся печах при температуре 1100°С. При этом свинец и цинк улетучиваются на 99%, а щелочные металлы — на 85%. Далее их оксиды конденсируются в холодных частях газоотводящего тракта, а пыль осаждается в газоочистке. Получаемый металлизированный продукт используют в доменной плавке, а мелочь, образующуюся в процессе восстановления, добавляют к агломерационной шихте. При содержании цинка в пыли вращающихся печей 10–30% (по массе) ее используют в качестве сырья для цветной металлургии, металлизированные окатыши используют в доменном процессе. В Японии работало 6 таких установок производительностью от 60 до 180 тыс. т/год. Однако, начиная с 1977 г., такие установки больше не строят из-за высоких капитальных и эксплуатационных затрат.

Компаниями KobeSteel и Midrex direct reduction corporation разработаны и внедрены в производство процессы Fastmet и Fastmelt для переработки пылей от электросталеплавильных печей. Fastmet впервые запущен в эксплуатацию в 1995 г. на заводе в г. Какогава (Япония). Процесс основан на восстановлении железа во вращающихся кольцевых печах. Шихтовыми материалами являются восстановитель (коксовая мелочь) и пыль (в виде окатышей). Рабочие температуры 1300–1350°С, процесс восстановления происходит в течение 8–10 мин. Конечными продуктами являются: железо прямого восстановления (степень металлизации 75–94%) и сырой оксид цинка (50–65% Zn).

Процесс Fastmelt отличается от процесса Fastmet наличием электропечи. Основным преимуществом является возможность извлечения железа до 98%. Технология окупается при переработке не менее 200 тыс. т пыли ДСП в год.

Недостатки процесса:

- высокий расход газообразного топлива — около 100 м³/т перерабатываемой пыли;
- количество перерабатываемого сырья должно составлять не менее 200 тыс. т;
- нестабильный состав железа прямого восстановления;
- низкий выход сырого оксида цинка.

Компания Nippon Steel восстанавливает железо в железосодержащих пылях в печах с вращающимся подом по технологии RHF (rotary hearth furnace — RHF), разработанной в техническом центре Midrex Technical Center, США.

На металлургическом заводе компании Thyssen Stahl AG (Германия) сооружена специальная установка по переработке пылевидных отходов в целях максимального извлечения цинка и свинца.

После окомкования пыли полученные гранулы поступают в реактор кипящего слоя, где при температуре 1000°С в восстановительной атмосфере происходит возгонка примесей цветных металлов и удаление образующихся паров, содержащих цинк, свинец и щелочные элементы. Далее в циклонах продукты возгонки отделяются от пыли, а гранулы, состоящие в основном из оксидов железа, после охлаждения поступают на аглофабрику. Пыль, осажденная в циклонах, возвращается в реактор кипящего слоя, а возгоны после охлаждения отделяют от газа в рукавных фильтрах и направляют на рециклинг уловленных в них цинка и свинца, степень извлечения которых достигает 80%.

За последние 20 лет промышленного масштаба достигли следующие пирометаллургические технологии:

- Primus Process (Paul Wurth) — 1 установка производительностью 85 тыс. т отходов в год эксплуатируется в Люксембурге, вторая — на Тайване мощностью 120 тыс. т/год;
- ZincOx Resources — 1 действующее предприятие в Южной Корее производительностью 400 тыс. т отходов в год;
- технология переработки в индукционной печи (PIZO) — 1 предприятие в США;
- комбинация дуговой электропечи с гидрометаллургическим принципом Ezinex (Engitex) — 1 установка в Италии.

Одним из преимуществ этих процессов является возможность параллельного восстановления других ценных элементов наряду с цинком. К недостаткам можно отнести высокое энергопотребление, низкий выход и низкое качество получаемого оксида цинка и железной фазы. Кроме этого, относительно низкая производительность, а также взаимодействие возгоняемого цинка с огнеупорной футеровкой.

Пирометаллургическая технология Primus Process разработана старейшей люксембургской компанией Paul Wurth, основанной в 1870 г., для переработки отходов металлургических производств путем прямого восстановления.

Технология Primus используется для переработки доменных и конвертерных шламов, прокатной окалины, в том числе замасленной, пыли электросталеплавильного производства, в качестве восстановителя используется уголь. Технологический процесс — двухступенчатый, основными агрегатами являются многоподовая печь (MHF — Multi Hearth Furnace) и электродуговая печь. Максимальная рабочая температура не превышает 1100°С. За счет прохождения экзотермических реакций полного дожигания СО выделяется тепло, которое обеспечивает процесс необходимой энергией. Многоподовая печь состоит из нескольких камер одна на другой, соединенных между собой сквозными отверстиями, которые расположены в дне и потолке камер. По рукавам, оснащенным колосниковыми решетками, шламы проходят через различные камеры по пропускным отверстиям, постепенно опускаясь на дно печи. В твердом растворе концентрация окислов металлов, содержащихся в побочных продуктах, снижается. В отличие от железа, оксиды цинка и свинца выносятся вместе с газом

и улавливаются в рукавных фильтрах. Электродуговая печь, расположенная под многоподовой печью, переплавляет железо прямого восстановления в литейный чугун, который поставляется на сталелитейные заводы. В результате применения технологии Primus из них получают оксид цинка (с содержанием металла более 60%) и гранулированный чугун, который впоследствии переплавляется в литейный чугун. Образующийся шлак используется в дорожном строительстве.

Первая установка по технологии Primus была построена в Люксембурге на заводе Primores в 2003 г. Ее производительность составляет 85 000 т/год, что позволяет переработать весь объем тонкодисперсной пыли из электродуговых печей и шламов от прокатных станов, вырабатываемых сталелитейной промышленностью Люксембурга. В состав установки входят многоподовая печь с восемью подами внутренним диаметром 7,7 м и электродуговая печь мощностью 10 МВт с внутренним диаметром 3,5 м. На тонну шихты установка производит 250 кг чугуна, 350 кг вторичной пыли (концентрат оксида цинка) и 200 кг шлака при среднем расходе угля 320 кг, электроэнергии — 1,05 МВт. В 2009 г. запущена в эксплуатацию установка в Тайване на заводе Dragon Steel.

Технология компании ZincOx Resources основана на использовании в качестве основного агрегата вращающейся подовой печи и похожа на технологию Fastmet.

Технологический процесс включает брикетирование пылевидных железосодержащих отходов и угольной мелочи со связующим, прокалку их в печи с вращающимся подом при температуре > 1250°С. Уголь в брикетах действует как восстановитель, реагируя с оксидами цинка и железа, которые восстанавливаются до металлической формы. При температуре в печи металлический цинк представляет собой пар, который испаряется, но быстро реагирует с кислородом в верхней части печи, образуя очень мелкие частицы оксида цинка, которые выносятся с отходящими газами. Железо остается в брикете в виде очень мелких частиц, тесно связанных с другими элементами, которые образуют шлак. Отходящие газы охлаждаются, а твердые частицы регенерируют в обычной рукавной фильтровальной камере. Уловленный конденсат состоит в основном из оксида и солей цинка. Непрерывный характер процесса и дожигание газов в печи делают технологию очень энергоэффективной.

Фирма Kuttner разработала технологию переработки металлургических отходов Охусир. Мелкодисперсные отходы (пыль и шлак) смешивают с восстановителем, загружают в виде так называемых С-брикетов. Брикеты вместе с коксом, флюсами и другими железосодержащими отходами (сварочный шлак, скрапины и др.) загружают в шахтную печь.

Загрузка шихты осуществляется сверху и, находясь в противотоке с отходящими газами, она нагревается. При температуре около 1000°С происходят процессы восстановления металлов. Продуктами являются металл (чугун) и шлак, которые выпускаются непрерывно. При температуре 1500°С происходит выпуск чугуна с содержанием углерода около 4%. Испарившийся цинк удаляется из печного пространства вместе с колошниковыми газами, являясь вторичным продуктом.

Процесс PIZO разработан компанией Heritage (США) и позволяет перерабатывать пыль с получением сырого оксида цинка, чугуна и шлака.

PIZO — это непрерывный одностадийный процесс, обеспечивающий переход 95% железа в чугун при содержании цинка в сыром оксиде цинка 65–70%. Основной технологической установкой является индукционная печь.

Перспективными являются разработки вельц-технологии, комбинированной с выщелачиванием. Такая комбинация успешно реализована компаниями Horsehead (США), Glencore (Италия) и «Акита» (Япония). Очевидными преимуществами этой технологии являются:

- производство металлического цинка — и поэтому независимость от первичных цинковых заводов;
- возможность извлечения свинца и серебра;
- удаление хлора и фтора до минимального уровня.

Недостатками являются:

- высокие инвестиционные затраты, а значит, высокая стоимость цинка;
- не достигается восстановление железа;
- не достигается требуемое качество цинка при электролизе.

Перспективным направлением является использование плазменного нагрева для извлечения из пыли легко испаряющихся компонентов. Плазменные технологии достаточно гибки к изменениям параметров процесса и характеризуются надежными и управляемыми энергетическими параметрами. Преимуществом плазменной технологии является также возможность исключения стадии предварительного окускования пыли. После извлечения цветных компонентов обработанную пыль можно вернуть обратно, в металлургический цикл.

Существуют различные технологии плазменной переработки цинк- и свинецсодержащей сталеплавильной пыли (например, Tetronics, ScanDust и ArcFume, технология компании «Минтек», технология компании SKF, Davy, Mannesmann-Demag).

Примерами плазменного способа переработки железосодержащих отходов являются процессы шведских разработчиков: ScanDust и ArcFumes. Технология ScanDust позволяет перерабатывать пыль электросталеплавильного процесса, которая поступает в смеситель с коксом и водой и перемешивается. Лишняя вода удаляется, а смесь инжектируется в нижней части плазменного генератора. Конечными продуктами процесса являются металл, шлак и газ. Металл возвращают в металлургический цикл, шлак используют для дорожно-строительных работ, газ можно возвращать в плазменный генератор или использовать для теплоснабжения. Уловленный цинк отделяют и восстанавливают в других процессах.

Процесс ArcFume применяется в Норвегии в городе Хёйангер для восстановления оксида цинка из пыли и перерабатывает 50 000 т пыли в год. Использование данной технологии осложняется жесткими требованиями, предъявляемыми к качеству сырья: химический состав, размер частиц, содержание влаги. Пыль смешивается с восстановителем (углем, угольной пылью, коксом), полученная смесь подается в печь. Оксид цинка восстанавливается до газообразного металлического цинка и покидает рабочее пространство печи с восстановительным газом. Газовая смесь сжигается с помощью примеси сжатого воздуха непосредственно над шлаковой ванной. Пар цинка преобразуется в ZnO, а CO и H₂ окисляются в CO₂ и пар. Мелкие частицы оксида цинка переносятся отходящим газом через систему охлаждения газа и собираются в рукавный фильтр. Оксид железа восстанавливается до FeO, который образует шлак, содержащий в основном оксид железа, диоксид кремния и известь.

Компания Tetronics (Великобритания) имеет опыт переработки цинксодержащих пылей в плазменно-дуговой печи типа электросталеплавильной с центральным вращающимся наклонным плазмотроном (катодом) и ванной (анодом). Данная технология является одностадийным процессом с одним или несколькими электродами, печью постоянного тока и с атмосферой аргона.

В качестве шихтовых материалов (не требующих окускования) загружают пылевидные отходы, флюс, кокс. Восстановление происходит при температуре 1500–1550°С. Разложение органических и неорганических соединений происходит при температуре 1500°С (для большей части реактора) и около 10 000°С (для ядра плазменной дуги). Конечные продукты — чугуны, шлак и сырой оксид цинка.

Производители отмечают следующие преимущества технологии:

- минимальное воздействие на окружающую среду;
- простота управления и обслуживания;
- относительно низкие капитальные затраты и эксплуатационные расходы;
- универсальность, технология может перерабатывать широкий спектр отходов и др.

Плазменные установки компании Tetronics эксплуатируются в Японии, Великобритании, Италии, Германии и Корее.

Технология плазменно-дуговой переработки электросталеплавильной пыли, разработанная компанией «Минтек» (США), включает плазменно-дуговой комплекс из четырех печей мощностью от 30 кВт до 1 МВт. Печи работают на постоянном токе, графитовый электрод служит катодом, а расплав в ванне печи — анодом. Производительность процесса — от 5 до 100 кг/ч для печи мощностью 200 кВА. Плазмообразующий газ (азот или аргон) подается через центральное отверстие в графитовом электроде.

С начала 1970-х гг. в мире активно развиваются процессы жидкофазного восстановления железа из дисперсного вторичного сырья (доменные и конвертерные пыли и шламы, прокатная окалина), позволяющие получить из отходов дешевый чугун. Основными являются «Корекс» (Австрия, Германия, с 1977 г.), «Ромелт» (Россия, 1979 г.), HISMelt (Германия, 1984 г.), DIOS (Япония, 1988 г.), AusIron (Австрия, 1994 г.), Finex (Австрия).

Обычно жидкофазный процесс — двухстадийный: на первой стадии происходит нагрев и частичное восстановление (до 50%) сырья газом, отходящим из второй стадии процесса, на которой происходит окончательное восстановление продукта. Для предварительного восстановления используют шахтные печи или реакторы кипящего слоя. Окончательное восстановление происходит в низкошахтных печах (в т. ч. в электропечах) или в агрегатах конвертерного типа.

Наиболее освоенным из жидкофазных процессов является процесс «Корекс» (Corex), разработанный совместно компаниями Voest Alpine (Австрия) и Korf Engineering (Германия). В настоящее время работают установки производительностью 60 тыс. т/год (Германия) и 300 тыс. т/год компании ISCOR (ЮАР). Разработана конструкция установки «Корекс» второго поколения производительностью 600 тыс. т/год. Сущность процесса: предварительное восстановление в шахтной печи (типа печи «Мидрекс» с горячей разгрузкой) газом, отходящим из плавильного агрегата — газификатора, куда загружается предварительно восстановленный материал и где происходит его окончательное восстановление, а также газификация угля, вдуваемого в агрегат с кислородом.

Развитием процесса Corex является разработанный компанией Voest Alpine и исследовательским центром компании POSCO процесс Finex, в котором используется мелкое (крупность до 8 мм) железорудное сырье. В процесс Finex предварительное восстановление руды протекает в реакторах с кипящим слоем, а затем последующее получение чугуна из частично металлизированного сырья — в печи-газификаторе. Предварительно восстановленное сырье со степенью металлизации 85–90% брикетировано и через загрузочные люки подается в плавильную печь-газификатор. Процессы в печи-газификаторе агрегата Finex практически не отличаются от таковых в процессе Corex. Программа разработки и исследования технологии предусматривала переоборудование установки Corex производительностью 600 тыс. т чугуна в год в модуль Finex, испытание и отработку технологии, а затем строительство нового, более производительного модуля. Вторая (новая) установка Finex производительностью 1,5 млн т чугуна в год была запущена в апреле 2007 г. на заводе в Южной Корее.

Технология РОМЕЛТ, разработанная в МИСИС, реализована в опытно-промышленном масштабе в 1984 г. на НЛМК. В 1997 г. при участии компании Samsung Heavy Industries сооружена пилотная установка в городе Таеджон (Республика Корея) для отработки технологии переработки в печи «Ромелт» твердых бытовых отходов. В 2008 г. на заводе компании АВ Metals (г. Балхаш, Казахстан) пущена в эксплуатацию промышленная установка мощностью 32 тыс. т чугуна в год. В 2015 г. запущена в эксплуатацию установка в Мьянме мощностью 205 тыс. т чугуна в год.

Ромелт — это непрерывный способ получения чугуна из железосодержащего сырья и отходов с применением энергетических углей. В печь с расплавом шлака через нижние фурмы вдувается кислородно-воздушная смесь, которая интенсивно перемешивает шлак. В качестве железосодержащего сырья используются шламы доменного и сталеплавильного производств, колошниковая пыль, пыли электропечей, окалина прокатная (в том числе

замасленная) и конвертерная. Железосодержащая шихта и уголь непрерывно загружаются сверху на поверхность шлакового расплава с температурой 1400–1500°С. Предварительной подготовки пылевидного сырья или угля не требуется. Уголь выполняет две функции — топлива и восстановителя. Образующийся в результате восстановления чугуна осаждается на дно (подину) печи. Металл и шлак выпускают через отверстия (летки), выполненные на разных уровнях. Летучие элементы Zn, Pb, Ag выносятся с дымовыми газами и при охлаждении осаждаются в пыль, где их концентрация многократно возрастает. Пыль процесса «Ромелт» является сырьем для получения цветных металлов. Завод «Ромелт» производительностью 280 тыс. т отходов в год построен в Мьянме. Дальнейшего промышленного распространения технология не получила.

Процесс Dios впервые был реализован на полупромышленной установке с номинальной мощностью 180 тыс. т чугуна в год в 1993 г. на заводе «Кэйхин» фирмы НКК (Япония). Процесс трехстадийный, включающий подогрев шихты из мелкой руды и пылевидных отходов до 600°С в реакторе псевдосжиженного слоя, предварительное восстановление (степень восстановления 27–30%) в реакторе кипящего слоя при температуре 780°С и окончательное восстановление в реакторе жидкофазного восстановления под давлением 2×10^5 Па.

Общим недостатком жидкофазных процессов является сложность промышленной реализации и высокая капиталоемкость.

ПЕРЕРАБОТКА ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ С УЧЕТОМ МЕЖОТРАСЛЕВЫХ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ

Вторичными ресурсами металлургии наряду с отходами собственно металлургического производства являются отходы, образующиеся в других сферах деятельности. Замена используемых в металлургии природных ресурсов вторичными сырьевыми компонентами, полученными на основе отходов различных отраслей, способствует экономии материально-энергетических ресурсов.

Мировая практика показала, что основная масса всех образующихся техногенных отходов не может быть переработана на тех предприятиях, где эти отходы образуются. Все большее распространение получает практика использования отходов смежных отраслей. При решении этой проблемы особая роль отводится черной металлургии. Предприятия черной металлургии в состоянии переработать с высокой степенью эффективности подавляющее большинство отходов самых разных отраслей: от автомобильного металлолома до бытовых отходов.

Это обусловлено тем, что комплекс современных предприятий черной металлургии включает агрегаты и производства с полным набором возможных технологических характеристик:

- широкий температурный диапазон;
- нейтральная, окислительная или восстановительная атмосфера;
- активные шлаковые расплавы;
- диапазон давлений от 1 МПа и более до технического вакуума;
- полный набор оборудования для подготовки отходов (дробление, помол, сушка и пр.);
- полный набор для улавливания и очистки выделяющихся газов.

Переработка отходов в высокотемпературных металлургических агрегатах при температуре 1500–2000°С с активной окислительно-восстановительной атмосферой в присутствии соединений кальция обеспечивает полное разложение токсичных веществ до безопасных соединений, переход неразложившихся токсичных соединений в шлак и его остеклование.

В последние годы вовлечение металлургических агрегатов в переработку различных видов отходов наблюдается во всем мире. Металлурги разных стран мира, начиная со второй половины XX в., предлагают и успешно реализуют идеи утилизации в высокотемпературных металлургических агрегатах широкого спектра различных отходов, включая токсичные.

Синтетические легкоплавкие флюсы для черной металлургии на основе фторуглеродистых отходов алюминиевого производства

Фторуглеродистые отходы алюминиевого производства являются одним из наиболее массовых и экологически опасных видов отходов алюминиевой промышленности. Ежегодно на алюминиевых заводах России образуется более 70 тыс. т отработанной футеровки электролизеров (ОУФЭ) и около 100 тыс. т мелкодисперсных отходов (хвосты флотации угольной пены, шламы и пыли газоочисток и аспирационных установок). Количество отходов, накопленных в отвалах и шламонакопителях, составляет более 2 млн т. Перечисленные отходы содержат ряд токсичных компонентов: фториды, цианиды, полициклические ароматические углеводороды и др.

В то же время благодаря комплексному составу и уникальным свойствам фторуглеродистые отходы электролитического производства алюминия являются перспективным сырьем для производства уникальных синтетических легкоплавких флюсов, выполняющих в металлургических процессах одновременно несколько важных технологических функций:

- высокоэффективного разжижителя шлака вследствие наличия в их составе легкоплавких фторидов натрия и алюминия;
- дополнительного топлива благодаря достаточно высокому содержанию углерода;
- десульфуратора чугуна и стали благодаря содержанию активных соединений натрия.

Инновационным предприятием ООО «Экологический региональный центр» (Россия) разработан, запатентован и реализован на практике комплекс технологических решений по получению на основе фторуглеродистых отходов алюминиевого производства кусковых и брикетированных синтетических легкоплавких флюсов для черной металлургии (рис. 18.5).



Рис. 18.5. Кусковые и брикетированные синтетические легкоплавкие флюсы на основе фторуглеродистых отходов алюминиевого производства

Технология получения кусковых синтетических флюсов заключается в дроблении и сортировке кусковых фторуглеродистых отходов с получением фракций заданного размера, которые затем обрабатываются суспензией реагента, нейтрализующего токсичные соединения и повышающего рафинирующую способность флюса. Технология получения брикетированных синтетических флюсов заключается в смешивании мелкодисперсных фторуглеродистых отходов с водой и реагентом по определенному технологическому регламенту, выдерживании полученной шихты на воздухе и брикетировании.

Синтетические флюсы имеют следующие преимущества по сравнению с существующим аналогом (плавиковый шпат):

- более низкая температура плавления (на 250°С), что обеспечивает быстрое наведение жидкоподвижных шлаков в металлургических агрегатах;

- комплексный состав, включающий легкоплавкие фториды, углерод, соединения натрия и кальция, что обеспечивает его многофункциональность в металлургических процессах;
- низкое содержание примесных балластных компонентов;
- регулируемые состав и свойства с учетом требований потребителей благодаря технологии производства, включающей шихтование сырьевой смеси из фторуглеродистых отходов с различающимися свойствами (химсостав, крупность);
- низкая стоимость.

Кусковые синтетические флюсы впервые были испытаны в 1994–1995 гг. в доменном производстве ОАО «ЗСМК» на доменных печах № 1–3 для решения проблем дефицита кокса и проплавки тугоплавких титаносодержащих окатышей Качканарского ГОКа. В период испытаний было отмечено значительное улучшение жидкотекучести шлака при стабильной работе доменной печи. С 1 декабря 1994 г. комплексные флюсы были введены в шихту доменной печи № 3 и с 8 декабря — в шихту доменной печи № 1. Расход комплексных флюсов на доменной печи № 3 колебался от 29 до 109 т/сутки или от 6,7 до 20,0 кг/т чугуна (ср. 11 кг/т), на доменной печи № 1 — от 15 до 74 т/сутки или от 3,0 до 14,0 кг/т чугуна (ср. 6,0 кг/т). Всего за период опытно-промышленной кампании в 1994 г. было переработано 3192 т комплексных флюсов. В 1995 г. в доменных печах ОАО «ЗСМК» было переработано 22 692 т комплексных флюсов при среднем расходе на печах 8 кг/т чугуна при колебаниях расхода от 3 до 15 кг/т чугуна. Использование комплексных флюсов с расходом 12 кг/т чугуна при одновременной переработке неофлюсованных окатышей Качканарского ГОКа в количестве 20% обеспечило значительное улучшение жидкотекучести и обессеривающей способности шлаков. Достигнуто снижение содержания в чугуне серы в 2,4 раза, а также уменьшение расхода кокса на 5,2%, снижение образования шлака на 14–16% по сравнению с периодом, когда неофлюсованные окатыши перерабатывались без использования комплексных флюсов.

В 2001 г. комплексные синтетические флюсы внедрены в доменном производстве ОАО «КМК» (позднее ОАО «НКМК»). Начиная с 2002 г. комплексные синтетические флюсы постоянно использовались в доменных печах ОАО «НКМК». В 2002 г. на двух доменных печах переработано 3861 т флюса, удельный расход колебался от 0,7 до 8,7 кг/т чугуна (в отдельные периоды — до 10–15 кг/т), средний расход — 1,8 кг/т чугуна. Экономия кокса составила 2896 т.

Промышленные испытания опытной партии брикетированных синтетических флюсов в 350-тонном конвертере ОАО «ЗСМК» показали эффективность их применения в качестве разжижителей шлаков взамен традиционных, установлено отсутствие влияния брикетов на условия труда в конвертерном цехе.

Отработанные автомобильные покрышки (ОАП)

В мире ежегодно образуется не менее 10 млн т отработанных автомобильных покрышек, в том числе в странах ЕС — 2,3 млн т, в США — 2,6 млн т, в СНГ — 2,5 млн т. Наиболее распространенным способом их утилизации является сжигание для получения тепла и электроэнергии. Резиновая составляющая покрышек характеризуется низкой зольностью — 2–3% — и высокой теплотой сгорания — на уровне 7000–9000 ккал/кг, что обуславливает их ценность как топлива. В связи с этим в США и Великобритании развивается строительство электростанций, использующих в качестве топлива автомобильные шины.

Благодаря высокой энергетической ценности отработанные автомобильные покрышки могут быть использованы в качестве вторичных энергетических ресурсов в металлургических процессах. Так, например, сталелитейная компания Nippon Steel в Японии использует отработанные автопокрышки как часть железосодержащего скрапа и угля в плавильных печах, таким способом утилизируется около 5 млн шин в год. Компания Stebbing Engineering Division Accelerated Technologies Corporation (США) запатентовала метод чистого сжигания

старых покрышек в электродуговых печах как способ использования покрышек и замену угля. Достигнуто 20%-ное уменьшение выбросов CO₂, система отчистки дымового газа осталась без изменений, уровни серы часто ниже, чем при использовании угля, и улучшены результаты плавления из-за корда в покрышках.

На ОАО «ЗСМК» разработана и внедрена технология переработки отработанных автомобильных покрышек как альтернативного внешнего топлива в конвертерном процессе с предварительным нагревом лома. Целесообразность использования ОАП в данной технологии обусловлена следующими качественными характеристиками покрышек:

- 1) низкий уровень влажности и зольности;
- 2) высокая теплота сгорания, превышающая теплоту сгорания углей и даже кокса;
- 3) отсутствие подверженной выносу из конвертерной ванны мелочи;
- 4) высокий выход летучих веществ, горение которых обеспечит быстрый и равномерный прогрев лома;
- 5) наличие железа в корде.

Высокая температура (1300–1500°С) и избыток технически чистого кислорода (99,99%) в конвертерной ванне обеспечивают быстрое и полное сгорание покрышек без выделения сажи и других продуктов неполного сгорания, включая бензапирен. Наличие мощных газоочистных устройств мокрого типа с замкнутыми циклами оборотного водоснабжения практически полностью исключает вероятность загрязнения окружающей среды. При этом открывается возможность утилизации покрышек малого и среднего размера массой до 100 кг в целом виде без специального измельчения, что значительно сокращает себестоимость переработки.

В 2001–2002 гг. на Западно-Сибирском металлургическом комбинате проведена серия промышленных экспериментов, а начиная с 2003 г. освоена технология выплавки стали в конвертерах с использованием отработанных автомобильных покрышек для частичной замены каменного угля в период предварительного прогрева лома. Технология предусматривает ввод в конвертер на стадии предварительного нагрева лома при одновременной подаче кислорода средне- и малогабаритных автопокрышек в целом виде. Органическая часть покрышек сгорает с выделением значительного количества тепла, металлический корд расплавляется, заменяя часть металлолома.



Рис. 18.6. Переработка отработанных автомобильных покрышек в кислородных конвертерах Западно-Сибирского металлургического комбината

Установлено, что использование отработанных автопокрышек в технологии выплавки стали в конвертере при их расходе 3,3–5,5 кг/т стали, или 27–51% от общего расхода твердого топлива, обеспечивает снижение общего расхода топлива при отсутствии влияния на технологические показатели плавки и качество изготавливаемой стали. Показано, что технология переработки автопокрышек в кислородно-конвертерном процессе является

низкозатратным, экономически эффективным и экологически безопасным способом, обеспечивающим полную утилизацию покрышек, накопившихся в регионе расположения металлургических предприятий. Общий экономический эффект от внедрения технологии в условиях ОАО «ЗСМК» составил в 2005 г. 3,04 млн руб. В апреле 2006 г. общее количество переработанных автомобильных покрышек составило 1 млн штук.

В 2004 г. технология переработки отработанных автопокрышек в кислородных конвертерах стала лауреатом конкурса «Национальная экологическая премия» за вклад в укрепление экологической безопасности и устойчивое развитие России.

Отходы пластмасс

Металлургические процессы традиционно являются мощными потребителями энергетических ресурсов, составляющих значительную долю в себестоимости продукции. В связи с устойчивой тенденцией роста цен на природные энергоносители, наблюдаемой в последние годы, проблема снижения их удельного расхода на 1 т металлопродукции приобретает особенно большое значение. Перспективным направлением решения этой проблемы является разработка новых технологий металлургического передела с использованием возобновляемых альтернативных видов энергоресурсов, одним из наиболее доступных из которых являются отходы пластмасс.

Металлургические компании Германии и Японии уже более 20 лет вдувают измельченные отходы пластмасс в форменную зону доменных печей, обеспечивая существенную экономию кокса. Пластмассы по химическому составу и теплоте сгорания подобны природным ископаемым топливам — природному газу, нефти, углям.

Германская фирма Stahlwerke Bremen GmbH перерабатывает в доменных печах свыше 70 тыс. т в год отходов пластмасс. Фирма Eko-Stahl в г. Айзенхюттенштадт вдувает отходы пластмасс в доменные печи с 1996 г. с устойчивым расходом 30–60 кг/т чугуна, обеспечивая экономию кокса и мазута.

В Японии использование отходов пластмасс в доменных печах ведется с 1993 г. В 1996 г. фирма «Ниппон Кокан» в г. Кейхане вдувает отходы пластмасс в доменную печь объемом 4907 м³, максимальный расход пластмасс составляет 200 кг/т чугуна.

В настоящее время система рециклинга пластмасс, разработанная фирмой «Ниппон Кокан», широко используется японскими металлургическими компаниями, которые, поддерживая международный стандарт ISO 14001, проводят политику «истинной защиты глобальной окружающей среды» даже в тех случаях, когда в некоторой степени повышаются расходы. В 2000 г. в доменных печах было сожжено 190 тыс. т пластиковых отходов, а годовой потенциал их использования достиг 300 тыс. т в 2001 г. (в 1997 г. — 40 тыс. т). Японская компания JFE Group разработала технологию повторного использования промышленных и бытовых пластмассовых отходов в качестве вторичных ресурсов при производстве чугуна: отходы электробытовых приборов, бутылки из полиэтилентерефталата (ПЭТ), одноразовая пластиковая посуда и др. В настоящее время Япония приближается к уровню 1 млн т в год отходов пластмасс, перерабатываемых в доменных печах, что составляет 10% от уровня их ежегодного образования. Это обеспечивает снижение энергопотребления в черной металлургии на 1,5%.

Для организации переработки пластмассовой тары и упаковки на территории металлургических комбинатов в Кейхане и Фукуяме сооружено и введено в эксплуатацию оборудование по переработке пластика в доменное сырье общей мощностью 120 тыс. т/год. На оборудовании для переработки отходов в доменное сырье прессованные и упакованные отходы, собранные муниципальными органами, сортированные и отвечающие установленным требованиям, подвергаются измельчению и поступают в виброклассификатор для разделения пластика по видам и удаления посторонних предметов. Твердые формованные детали, бутылки и другие изделия направляются на участок ручной сортировки, на котором удаляют

объекты, непригодные для переработки, после чего материал поступает в измельчитель, где дробится до определенной крупности. Пленочный пластик после измельчения предварительно подвергают грануляции в грануляторе, получая зерна определенного размера. На оборудовании для переработки отходов пластика в доменное сырье отделяют и отбраковывают поливинилхлорид, который считается непригодным.

В доменной печи отходы пластмасс вдувают в нижнюю часть печи через воздушные фурмы. В фурменной зоне в условиях высоких температур (1600–1800°С) происходит термическое разложение пластмасс с образованием восстановительных газов CO и H₂, которые участвуют в восстановлении железорудного сырья. Восстановительная реакция проходит с участием водорода, поэтому по сравнению с плавкой только на коксе объем образующегося CO₂ уменьшается приблизительно на 30%. На восстановление железной руды расходуется около 60% вдуваемого пластика, а остальные 40% утилизируются в заводском хозяйстве как топливо для энергоагрегата и для доменных воздухонагревателей.

Регулярный мониторинг выбросов в атмосферу при переработке пластмасс в доменных печах германской фирмы Stahlwerke Bremen GmbH показал, что количество выбросов пыли, SO₂ и NO_x при использовании пластмасс находится существенно ниже уровня предельно допустимых выбросов. В выбрасываемых в атмосферу газах были обнаружены следовые концентрации диоксинов — менее 0,001 нг/м³, что более чем в 100 раз ниже уровня предельно допустимой концентрации (ПДК) диоксинов в атмосферном воздухе, составляющей в Германии 0,1 нг/м³.

В Московском институте стали и сплавов (МИСИС) разработана технология переработки в доменных печах пластмасс, в том числе хлорсодержащих.

Авторы технологии отмечают, что в фурменной зоне доменной печи при температуре свыше 1800°С и в условиях достаточного количества щелочных металлов практически весь хлор связывается в соединения NaCl, KCl, вследствие чего образование таких хлорсодержащих супертоксикантов, как диоксины и фураны, практически исключается.

На Западно-Сибирском металлургическом комбинате разработана и запатентована технология переработки отходов пластмасс в кислородно-конвертерном процессе, которая прошла успешные испытания в 350-тонных конвертерах. Отходы пластмасс (полиэтилен, полипропилен, полистирол) использовались в качестве дополнительного энергоносителя в технологии выплавки стали с пониженной долей жидкого чугуна.



Рис. 18.7. Спрессованные пластмассы в загрузочном совке перед подачей в кислородный конвертер

В период опытно-промышленных испытаний отходы в спрессованном виде загружались в 350-тонный конвертер в период прогрева лома и полностью заменяли традиционно используемые внешние теплоносители (уголь, кокс). Результаты проведенных опытных плавков

показали, что отходы пластмасс могут быть использованы в конвертерной плавке в качестве альтернативных энергоносителей. Рекомендован расход отходов 1–2 кг/т стали.

Условия конвертерной плавки (высокая температура 1400–1500°С, атмосфера технически чистого кислорода, высокая интенсивность массообмена, длительность пребывания отходов в конвертере, наличие извести и основного шлака, загрузка отходов небольшими партиями) способствуют полному исключению образования диоксинов и диоксиноподобных веществ при сжигании даже хлорсодержащих пластмасс. На основании результатов анализа 17 изомеров диоксинов и диоксиноподобных соединений (ПХДД — полихлорированные дибензо-п-диоксины и ПХДФ — полихлорированные дибензофураны) в составе газообразных выбросов установлено отсутствие влияния отходов пластмасс на концентрацию анализируемых соединений.

СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ

Вторичные ресурсы и произведенная на их основе продукция могут обеспечить равноценную или даже более эффективную замену природных ресурсов и первичного сырья в металлургии и других отраслях. Поэтому оценку эффективности технологий переработки вторичных ресурсов целесообразно производить по качественным показателям произведенной на их основе продукции в сравнении с продукцией из природного сырья, а также по технико-экономическим показателям производственных процессов их переработки.

Переработка металлургических шлаков

Качество продукции из металлургических шлаков должно удовлетворять требованиям существующих стандартов и технических условий.

Щебень, песок и готовые щебеночно-песчаные смеси для дорожного строительства, получаемые из текущих и отвальных шлаков, предназначаются для устройства всех видов покрытий, оснований и других конструктивных слоев дорожных «одежд» и должны удовлетворять по качественным показателям ГОСТ 3344–83 «Щебень и песок шлаковые для дорожного строительства. Технические условия». Щебень и песок из шлаков для бетонов должны соответствовать требованиям ГОСТ 5578–94 «Щебень и песок из шлаков черной и цветной металлургии для бетонов. Технические условия». Качество гранулированных шлаков, используемых для производства цемента, определяется в соответствии с ГОСТ 3476–74 «Шлаки доменные и электротермофосфорные гранулированные для производства цемента». Качество шлаковой пемзы, применяемой в качестве пористого заполнителя конструкционных и теплоизоляционных легких бетонов, определяется по ГОСТ 9760–75 «Щебень и песок пористые из металлургического шлака (шлаковая пемза)». Шлаки сталеплавильные для известкования кислых почв должны соответствовать техническим условиям ТУ 14–11–117–80 «Шлак сталеплавильный для известкования кислых почв».

Эффективность использования шлаковой продукции в сравнении с продукцией, произведенной из природного сырья, приведена в табл. 18.7.

Представленные данные показывают, что продукция, произведенная из металлургических шлаков, в случае ее соответствия требованиям стандартов или технических условий является эффективным заменителем продукции из природного сырья. Так, шлаковая пемза равноценна керамзиту, а шлаковый щебень — щебню из горных пород. Шлакопортландцемент заменяет портландцемент, а металлопродукт — амортизационный лом с коэффициентом замены 0,95. Шлаковая мука из сталеплавильных шлаков заменяет известковую муку с коэффициентом замены 0,94, а фосфат шлак заменяет суперфосфат с коэффициентом замены 0,80.

Таблица 18.7. Эффективность использования шлаковой продукции

Шлаковая продукция	Продукция из природного сырья	Коэффициент эффективности (замены)
Шлакопортландцемент	Портландцемент	0,95
Шлаковая пемза	Керамзит	1,0
Щебень шлаковый литой из доменных и сталеплавильных шлаков	Щебень из горных пород	1,0
Металлопродукт из шлаков	Амортизационный лом	0,95
Шлаковая мука из сталеплавильных шлаков	Известковая мука	0,94
Фосфатшлак	Суперфосфат	0,80

В табл. 18.8 приведены технологические показатели различных способов грануляции доменных шлаков и качества получаемой продукции.

Таблица 18.8. Технологические показатели различных способов грануляции доменных шлаков и качества получаемой продукции

Способ грануляции	Температура сливаемого шлака, °С	Расход шлака, т/мин	Расход воды, м ³ /т шлака	Давление воды, МПа	Влажность граншлака, %	Объемная насыпная плотность граншлака, кг/м ³
Мокрые способы						
Бассейновый	1300–1400	6,0–4,6	1,5–2,0	–	15–30	600–1000
Желобной	1300–1400	3,0–2,6	1,3–2,0	0,3–0,4	15–20	800–1000
Полусухие способы						
Центральной гидрожелобной	1300–1350	6,0–2,5	1,1–3,5	0,4–0,6	12–20	700–1000
Припечной гидрожелобной	1480–1620	8,0–13,0	3,0–5,0	0,3–0,4	12–17	900–1200
Барабанный	1300–1400	4,6–3,6	0,8–2,0	0,2–0,4	10–15	1000
Сухие способы						
Вододутьевой	1400–1550	5,0–10,0	0,6–0,8	0,3–0,4	5–10	1300
Воздушный барабанный	1400–1550	8,0–10,0	–	–	< 5	> 1300

Мокрые способы грануляции (бассейновой, желобной) характеризуются простотой конструкции и эксплуатации, однако имеют низкую производительность, наихудшие качественные показатели получаемого граншлака по влажности и объемной насыпной плотности, требуют дополнительного обезвоживания получаемого гранулированного шлака, не экологичны.

Полусухие способы грануляции (гидрожелобной, барабанный) являются значительно более производительными и обеспечивают требуемое качество получаемого граншлака, благодаря чему получили наибольшее распространение.

Представленные данные показывают преимущества припечных грануляционных установок по сравнению с центральными на примере гидрожелобного способа грануляции:

- более высокая производительность и эффективность переработки шлака вследствие того, что при центральном способе 30–35% шлака уходит на образование корок, коржей и настелей в ковшах, что определяет относительно низкий выход гранулированного шлака (не более 75%) из исходного огненно-жидкого шлака;
- более низкое давление воды;
- более высокое качество гранулята, в частности более высокая объемная насыпная плотность при более низкой влажности вследствие того, что за время транспортировки при центральном способе грануляции температура огненно-жидкого шлака снижается на 100–150°С, что ухудшает качество гранулята как материала для производства вяжущих веществ;
- низкие транспортные расходы, исключение из эксплуатации парка шлаковозных ковшей, что значительно упрощает организацию и удешевляет производство.

Эксплуатационные затраты при припечной грануляции шлака на 44% ниже, чем при центральной грануляции, капитальные затраты ниже на 55%.

Наиболее прогрессивными и эффективными являются сухие способы грануляции, позволяющие исключить оборотное водоснабжение и характеризующиеся высокой производительностью. Получаемый граншлак имеет низкие значения влажности и пористости и может быть использован в производстве строительных материалов. Сравнение эксплуатационных затрат показывает, что воздушная грануляция шлаковых расплавов в 1,5–2 раза экономичнее водных способов грануляции.

Одним из перспективных решений является охлаждение и затвердевание шлаковых расплавов в агрегатах с шаровой насадкой. Переработка жидких шлаков в таких агрегатах опробована практически на всех видах шлаков (доменные, сталеплавильные, ферросплавные).

В табл. 18.9 приведены технические характеристики основных способов грануляции металлургических шлаков и современный уровень требований к технологии и оборудованию.

Приведенные данные подтверждают преимущества воздушной грануляции металлургических шлаков, при этом наибольшей эффективностью характеризуется воздушный способ с охлаждением шлакового расплава в барабане с шаровой насадкой.

В табл. 18.10 приведены сравнительные технологические параметры шлакопемзовых установок.

Наиболее простым и характеризующимся наименьшими эксплуатационными затратами является траншейно-брызгальный способ, а наиболее сложным, затратным и взрывоопасным — бассейновый. По качеству получаемой продукции способы ранжируются следующим образом:

- 1) гидроэкранный;
- 2) вододутьевой;
- 3) бассейновый;
- 4) траншейно-брызгальный.

Таблица 18.9. Технические характеристики основных способов грануляции металлургических шлаков

Показатели	Водная грануляция	Воздушная грануляция	Воздушный с шаровой насадкой	Требуемый уровень
Вид шлака	Малая вязкость	Малая вязкость	Любой	Любой
Выход годного, %	50	90	100	100
Взрывобезопасность	Слабая	Высокая	Высокая	Очень высокая
Производительность, т/мин	1,5	2–2,5	1–3 (8)	3–5 (10)
Цикл процесса, мин.	5–6	1–2	1–2	1–2
Расход воды на охлаждение шлака, т/т	10:1	–	1:1	0,5:1
Давление в системе, МПа	0,25	0,35–0,6	0,3	0,4–0,6
Расход подаваемой воды, м ³ /ч	624	100	100–180	60–100
Вредные факторы	Парогазовая смесь	Шум 100 дБ	Парогазовая смесь	Парогазовая смесь
Фракционный размер частиц (> 90%), мм	< 5	< 6	< 10	< 10
Влажность гранул, %	15–20	< 5	< 5	< 5
Устойчивость структуры, потеря массы, %	< 3	> 5	< 3	< 3

Таблица 18.10. Технологические параметры шлакопемзовых установок

Способ	Температура сливаемого шлака, °С	Расход шлака, т/мин	Расход воды, м ³ /т шлака	Давление воды, МПа	Расход воздуха, нм ³ /т шлака	Давление воздуха, кПа	Длительность кристаллизации, ч
Гидроэкранный	1300–1350	3,0–12,0	0,3–0,4	0,4–0,8	–	–	16
Водовоздушный	1200–1300	2,0–3,5	0,4–0,6	0,6	100–170	9	4
Бассейновый	1250–1300	10,0–20,0	0,6	0,1	–	–	5
Траншейно-брызгальный	1250–1300	4,0–5,0	0,2–0,4	0,3–0,4	–	–	2
Барабанный	1200–1350	2,5–3,5	0,3–0,4	0,6	200–250	9	4

В табл. 18.11 приведены результаты расчетов, выполненных УралНИИЧМ, удельных капитальных затрат на организацию различных способов переработки доменного шлака в ценах 2018 г.

Таблица 18.11. Расчетная экономическая эффективность способов переработки доменного шлака

Продукция	Удельные капитальные затраты, руб./т	Эффект от переработки, руб./т
Граншлак	358,56	378,48
Шлаковая пемза	1733,04	298,8
Литой щебень	1235,04	7091,52
Шлаковая вата	8286,72	7748,88

Как следует из приведенных данных, наиболее экономически эффективным способом переработки доменного шлака является производство литого щебня и шлаковой ваты. Однако с учетом того, что организация производства шлаковой ваты требует наибольших капитальных затрат, производство литого щебня является наиболее эффективным.

Технологии переработки металлургических пылей и шламов

Несмотря на простоту способа утилизации металлургических пылевидных отходов в агломерации, в мире активно разрабатываются технологии их переработки с получением продукции с более высокой добавленной стоимостью — частично восстановленного или металлизированного железосодержащего сырья, а также концентратов цветных металлов, главным образом цинка. В табл. 18.12 представлена сравнительная характеристика основных разработок в этой области.

Высокая степень металлизации содержащегося в отходах железа (более 90%) при одновременном эффективном извлечении цинка достигается при переработке предварительно окомкованных отходов в трубчатых вращающихся печах, которые получили широкое распространение в мире. Исключение стадии окускования обеспечивается при использовании плазменных технологий, а также процессов жидкофазного восстановления. Комбинирование процессов восстановления и плавления позволяет получить в качестве конечного продукта чугуна.

В большинстве используемых технологий цинк извлекается из отходов в виде оксида, концентрат которого может быть использован только как заменитель руды в первичной металлургии цинка. При использовании механических способов степень цинка может быть на 10–15% ниже, чем при применении пирометаллургических, однако реализация первых значительно дешевле, а установки проще в эксплуатации и их реализацию производят на серийно выпускаемом оборудовании. Получение металлического цинка обеспечивается при использовании вельц-технологии, комбинированной с выщелачиванием.

Таблица 18.12. Сравнительная характеристика технологий переработки металлургических пылей и шламов

Процесс, компания	Суть технологического процесса	Степень металлзации железа, %, где используется продукт	Степень извлечения цинка, %	Преимущества	Недостатки
Брикетиrowание					
Компания «Аугуст Тиссен», Германия	Брикетиrowание смеси пылей и шламов со связующим (50%-ный сульфитный шелок) и угольной пылью, обжиг при 600–900°С в атмосфере CO:CO ₂ =3:1	0, доменная печь	0		
Процесс Ferro-Carb, США	Сухое смешивание Fe- и C-содержащих пылей, нагрев и перемешивание шихты со связующим, брикетиrowание, нагрев брикетов в окислительной среде для дегидратации и полимеризации связующего	0, доменная печь	0		
Компания SSAB Merox AB, Швеция	Пыли и шламы конвертерного производства, прокатная окалина смешиваются со связующим (портландцемент), вибропрессование, 24-часовая выдержка в камере, упрочнение на открытой площадке в течение 3 недель	0, доменная печь	0	Технологическая простота, более низкие капитальные и эксплуатационные затраты по сравнению с другими способами получения окискованного сырья, экологическая безопасность	Ограничение по содержанию в отходах цинка, свинца и щелочей, необходимость предварительной очистки отходов от цинка
Компания «Дофаско», США	Брикетиrowание шихты из Fe-отходов и колошниковой пыли, содержащей углерод, на вальцевых прессах	0, дуговая электропечь	0		
Компания «Ниссен сэйко», Япония	Смешивание шламов после фильтров и сушилки в барабанных сушилах с сухой пылью и прокатной окалиной, брикетиrowание со связующим, сушка брикетов в сушилках конвейерного типа. Улавливание возгонов цинка в тканевом фильтре в виде оксидов	0, электропечи	10–20% оксидов цинка в уловленной пыли		

<p>ПАО «НЛМК», Россия</p>	<p>Гомогенизированную смесь железорудного концентрата, мелкодисперсных отходов и связующего непрерывно подают в экструдер, удаляют из нее воздух вакуумированием и продавливают через фильеру экструдера с получением пластичных стержней, которые в процессе транспортирования и штабелирования распадаются на брикеты, размерами которых управляют путем изменения площади и формы отверстий в фильере</p>	<p>0, доменная печь</p>	<p>0</p>	<p>Простота технологического процесса, исключение необходимости сушки брикетов, высокая производительность (до 100 т/час), широкие возможности по форме и размерам брикетов</p>	<p>Ограничение по содержанию в отходах цинка, свинца и щелочей</p>
Горячее брикетирование					
<p>Компания «Грей айрон фаундри», США</p>	<p>Нагрев шихты из смеси доменных пылей и шламов, прокатной окатины, тонкоизмельченного металлолома в печи кипящего слоя при температуре 800–1000°С, брикетирование на вальцевых прессах</p>	<p>0</p>	<p>0</p>	<p>Возможность брикетирования без связующих веществ, надежность технологии, получение металлизированных брикетов</p>	<p>Ограничение по содержанию в отходах цинка, свинца и щелочей, необходимость предварительной очистки отходов от цинка</p>
<p>Компани «Фест-Альпине», Австрия, и «Тиссен» (Германия)</p>	<p>Горячее брикетирование сухой уловленной в электрофильтрах конвертерной пыли</p>	<p>0, конвертер в качестве охлаждителя</p>	<p>0</p>		
<p>Компания Lucchini, Италия</p>	<p>Окомкование смеси доменных и конвертерных пылей, горячее брикетирование</p>	<p>Металлизированный продукт, доменная печь</p>	<p>0</p>		

Таблица 18.12 (продолжение)

Процесс, компания	Суть технологического процесса	Степень металлзации железа, %, где используется продукт	Степень извлечения цинка, %	Преимущества	Недостатки
Восстановительный агрегат — вращающаяся трубчатая печь					
Компании «Крупп», «Лурги», Германия	Металлизация окатышей из доменных и конвертерных шламов без связующих веществ при температуре 1050°С, восстановитель — лигнит	92–95	98–99	Возможность переработки широкого спектра отходов по химическому и гранулометрическому составу, получение металлизованного продукта (Fe _{мет} — 70%) и концентрата цинка	Высокие капитальные и эксплуатационные затраты, значительные размеры трубчатой печи, сложность организации температурного контроля и управления тепловой и технологической работой печи, низкий КПД процесса металлзации
	Окомкование или брикетирование доменных и конвертерных шламов без связующих, сушка и подогрев на конвейере отходящими от печи газами, восстановление при 1050–1150°С, восстановитель — коксовая мелочь, барабанный охладитель, виброгрохот, магнитный сепаратор	95, доменная печь	99		
Компания «Сумитомо киндзоку коге», Япония	Окомкование пылей и шламов со связующим (0,5–1% бентонита), предварительный подогрев до 250°С, прокатка при 1050–1150°С, восстановитель — антрацит или коксик	88,8, доменная печь	90–96,4		
Компания «Ниппон кокан», Япония, технология СЛ-РН	Совместное измельчение и окомкование смеси пылей, шламов и тонкоизмельченной железной руды, обжиг и предварительное восстановление в конвейерной печи, восстановление во вращающейся печи, восстановитель — уголь с высоким выходом летучих веществ	Губчатое железо (Fe _{мет} — 95%), доменная печь	95	Получение губчатого железа (Fe _{мет} — 95%) и концентрата цинка	

Производство концентрата цинка					
Компания British Steel, Великобритания	Обработка колошниковой пыли в гидроциклоне, концентрация цинка в верхнем продукте	0, нижний продукт в агломерацию	99	Реализация на серийно выпускаемом оборудовании, капитальные и эксплуатационные затраты на подготовку шлама в 10–15 раз ниже, чем при получении из отходов металлургических окатышей	Невозможность получения восстановленного железа, низкая степень извлечения цинка — на 10–15% меньше, чем при применении пиromеталлургических
	Способ DeZn, компания Rasa Corp., Япония	Обдирка поверхностного слоя частиц доменного шлама, высокоэффективная классификация в вакуумном гидроциклоне	0, осадок (75–80% твердого вещества) с низким содержанием цинка в агломерацию	80–90 со сливом	Низкое энергопотребление; хорошо отработанная и оптимизированная технология; простота технологического процесса в одну ступень
Вельц-процесс, с 1970-х гг. доминирует в разных странах, НДТ на ближайšie 25 лет	Прокалка предварительно окомкованной шихты без восстановителя во вращающейся трубчатой печи при температуре 1200°С, улавливание возгонов цинка после конденсации в системе газоочистки	низкая	98, сырой оксид цинка (50–60% Zn)	Производство металлического цинка и поэтому независимость от первичных цинковых заводов; возможность извлечения свинца и серебра; удаление хлора и фтора до минимального уровня	Высокие инвестиционные затраты, высокая себестоимость цинка; низкая степень восстановления железа
	Вельц-технология, компания Horsehead (США), Glencore (Италия) и «Акинта» (Япония)	Вельц-технология, комбинированная с выщелачиваем	низкая	Продукт — цинк металлический	

Таблица 18.12 (продолжение)

Процесс, компания	Суть технологического процесса	Степень металлзации железа, %, где используется продукт	Степень извлечения цинка, %	Преимущества	Недостатки
«Тиссен-Шталь», Германия	Прокалка окомкованной пыли доменного и сталеплавильного цехов в кипящем слое при температуре 1000 °С в восстановительной атмосфере, отделение продуктов возгонки от пыли в циклонах, улавливание возгонов после охлаждения и конденсации в рукавных фильтрах	до 97	80	Исключение стадии окислования пылевидных отходов, эффективный тепло- и массообмен, высокая энергоэффективность	Невысокая степень использования газа-восстановителя, повышенный расход тепла, нарушение стабильности кипящего слоя вследствие слипания частиц при стени металлзации свыше 25–30%
Компании KobeSteel и Midrex direct reduction corporation, процессы Fastmet и Fastmelt	Fastmet — восстановление электросталеплавильных пылей во вращающихся кольцевых печах при температуре 1300–1350 °С, Fastmelt — в электропечи	Fastmet — 75–94, Fastmelt — 98, электропечь	98–99, сырой оксид цинка (50–65% Zn)	Возможность извлечения железа, высокая производительность процесса (время восстановления — 8–10 мин.)	Высокие капитальные и эксплуатационные затраты, высокое энергопотребление, окупаемость при переработке не менее 200 тыс. т пилей, нестабильный состав железа прямого восстановления
Primus Process, компания Paul Wurth, Люксембург	Двухступенчатый процесс. Доменные и конвертерные шламы, замасленная прокатная окалина, пыль электросталеплавильного производства, восстановитель — уголь, загружаются в многоподовую печь, где происходит предварительное восстановление при температуре 1100 °С. Железо прямого восстановления пеллавуется в электродуговой печи в литейный чугуны	85–90, конечный продукт — чугуны для дуговой электропечи или литейного производства	Концентрат оксида цинка с содержанием цинка более 60%	Широкий спектр перерабатываемых металлургических отходов, получение высококачественного конечного продукта в виде литейного чугуна и концентрата оксида цинка, исключение стадии брикетирования отходов	Высокие капитальные затраты, высокое потребление энергоресурсов
Международная компания ZincOx Resources, основана в 1997 г.	Брикетирование пылевидных железосодержащих отходов и угольной мелочи со связующим, прокатка в кольцевой печи с вращающимся подом при температуре > 1250 °С, улавливание возгонов цинка в рукавных фильтрах после охлаждения и конденсации	85–90, содержание Fe _{мет} в продукте — 61%	90, оксид и соли цинка	Высокая энергоэффективность благодаря непрерывному характеру процесса и дожиганию отходящих газов в печи	Высокие капитальные затраты

Технология Охусир, компания Kuttner, Германия	Брикетирующие смеси мелкодисперсных пылей и шламов и углеродистого восстановителя (кокс) на цементной связке, загрузка брикетов в шахтную печь, восстановление металлов при температуре 1000 °С, непрерывный процесс плавления брикетов в шахтной печи при температуре 1500 °С	85, процент — чугун с содержанием углерода около 4%	Улавливание возгон цинка в системе газоочистки (содержание цинка — более 30%)	Возможность переработки всех видов железосодержащих отходов, высокая производственная гибкость, экономичность и энергоэффективность вследствие повторного использования отходящих газов	Высокое потребление топлива, получение полупродукта цинка, который необходимо направлять на дальнейшую переработку в целях извлечения цинка
Процесс PIZO, компания Heritage, США	Непрерывный одностадийный процесс в индукционной печи	95	Содержание цинка в сыром оксиде 65–70%	Возможность параллельного восстановления других ценных элементов наряду с цинком	Высокое энергопотребление, низкий выход и низкое качество получаемого оксида цинка и железной фазы, относительно низкая производительность, взаимодействие с огнеупорной футеровкой
Плазменные технологии переработки цинксодержащей сталеплавильной пыли					
Технология ScanDust, Швеция	Перемешивание электросталеплавильной пыли с коксом и водой, инжектирование в нижнюю часть плазменного генератора, улавливание возгонов в газовом фильтре	Высокая, металл в металлургический цикл	Оксид цинка улавливают и восстанавливают в других процессах	Гибкость к изменениям параметров процесса, надежные и управляемые энергетические параметры, возможность исключения стадии окискования пыли	Высокие энергозатраты, жесткие требования к качеству сырья по химсоставу и крупности
Процесс ArcFume, Норвегия	Смешивание пыли с восстановителем (кокс, уголь, угольная пыль), подача в плазменную печь с восстановительной газовой атмосферой, улавливание частиц цинка в рукавном фильтре	Низкая, железо восстанавливается до FeO, который обрабатывает шлак	Оксид цинка улавливают и восстанавливают в других процессах		

Таблица 18.12 (окончание)

Процесс, компания	Суть технологического процесса	Степень металлизации железа, %, где используется продукт	Степень извлечения цинка, %	Преимущества	Недостатки
Компания Tetronics, Великобритания, компания «Минтек», США	Одностадийный процесс. Загрузка пылевидных отходов в плазменно-дуговые печи типа электросталеплавильной с центральным вращающимся наклонным плазмотроном (катодом) и ванной (анодом), плазмообразующий газ — аргон или азот. Восстановление при температуре 1500–1550 °С, разложение органических и неорганических соединений при температуре 1500 °С (для большей части реактора) и около 10000 °С (для ядра плазменной дуги)	Высокая, конечный продукт — чугун	97–99, сырой оксид цинка	Исключение стадии окислования пылевидных отходов, минимальное воздействие на окружающую среду, простота управления и обслуживания; относительно низкие капитальные затраты и эксплуатационные расходы; универсальность технологии, возможность переработки широкого спектра отходов	Высокие энергозатраты
Процессы жидкофазного восстановления железа из отходов					
Процесс Finex, компании Voest Alpine, Австрия, Rosco, Южная Корея	Двухстадийный процесс. Предварительное восстановление в шахтной печи (типа Мидрекс) отходящими газами из плавильного агрегата-газификатора, брикетирование предварительно восстановленного сырья и угля, газификация и расплавление восстановленного металлургического железа	85–90, получаемый продукт — чугун	Возможно получение концентрата цинка в уловленной пыли в системе газоочистки	Непрерывный процесс, возможность использования некоксуемого угля, получение чугуна при большей экономичности по сравнению с доменным процессом	Сложность освоения промышленной технологии вследствие наличия двух отдельных ступеней и многостадийности процесса, высокая капиталоемкость
Процесс «Ромелт», Россия	Одностадийный процесс. Непрерывная загрузка отходов (шламы доменного и сталеплавильного производства, колошниковая пыль, пыль электропечей, прокатная окалина) и восстановителя (уголь) сверху в шахтную печь с расплавом шлака, в которую через нижние фурмы вдувается кислородно-воздушная смесь	80, получаемый продукт — чугун	Возможно получение концентрата цинка в уловленной пыли в системе газоочистки	Непрерывный процесс, использование энергетических углей, простота в сравнении с двухстадийными процессами	Высокие капитальные затраты, сложность промышленного освоения

Вторичное сырье для металлургии на основе отходов других отраслей

На рис. 18.8 представлены сравнительные качественные показатели некоторых видов вторичного сырья на основе отходов, которое может эффективно заменить традиционно используемое первичное сырье в металлургии.

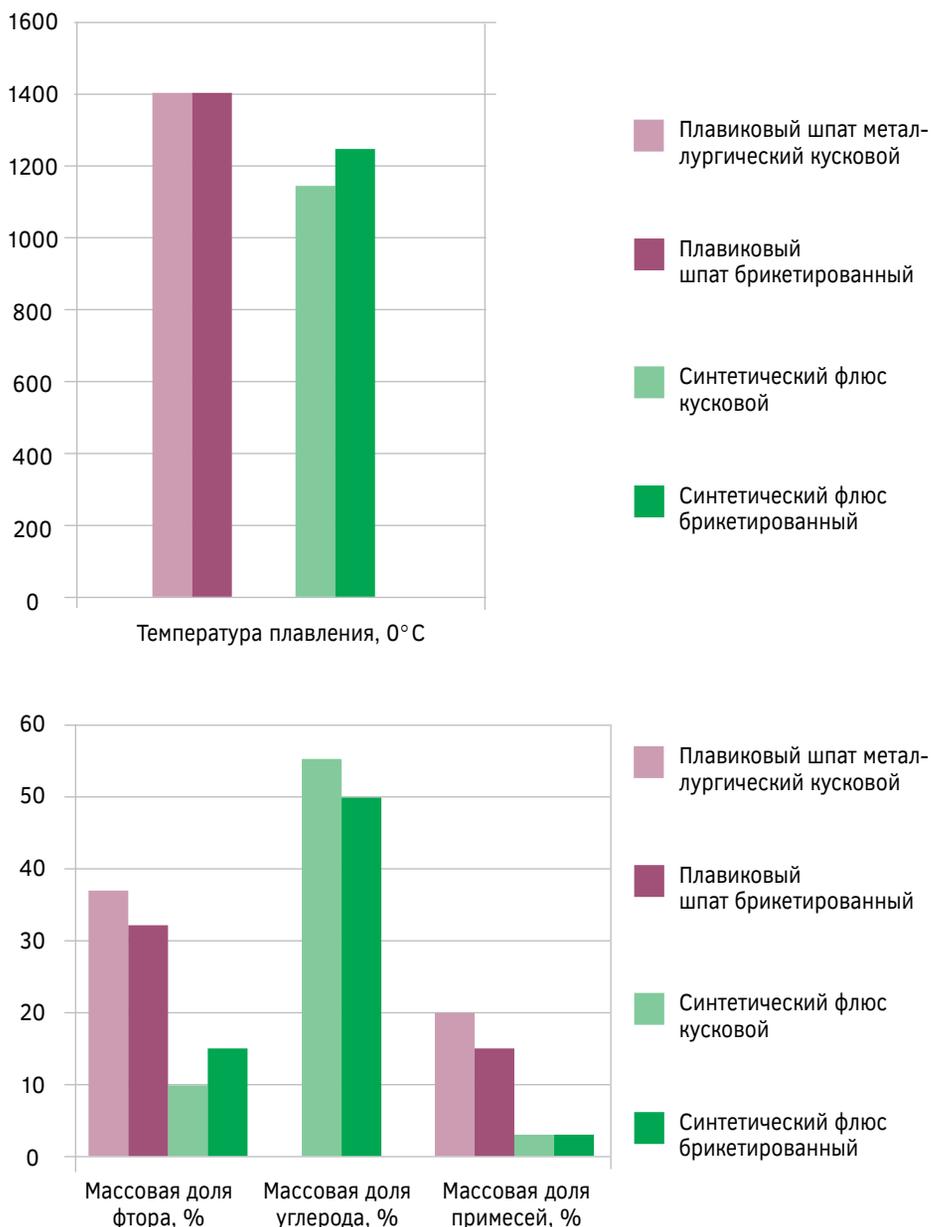


Рис. 18.8. Сравнительные качественные показатели синтетических легкоплавких флюсов на основе фторуглеродистых отходов алюминиевого производства и плави́кового шпата

Синтетические флюсы имеют следующие преимущества по сравнению с существующими аналогами (кусовой и брикетированный плави́ковый шпат):

- более низкая температура плавления (на 150–250°С);
- низкое содержание фтора, являющегося токсичным;
- более высокая энергетическая ценность вследствие высокого содержания углерода;
- низкое содержание балластных компонентов;
- низкая стоимость.

На рис. 18.9 представлена сравнительная энергетическая эффективность используемых в металлургии традиционных видов топлива (кокс, уголь) и вторичных энергоресурсов (пластмассы, резина).

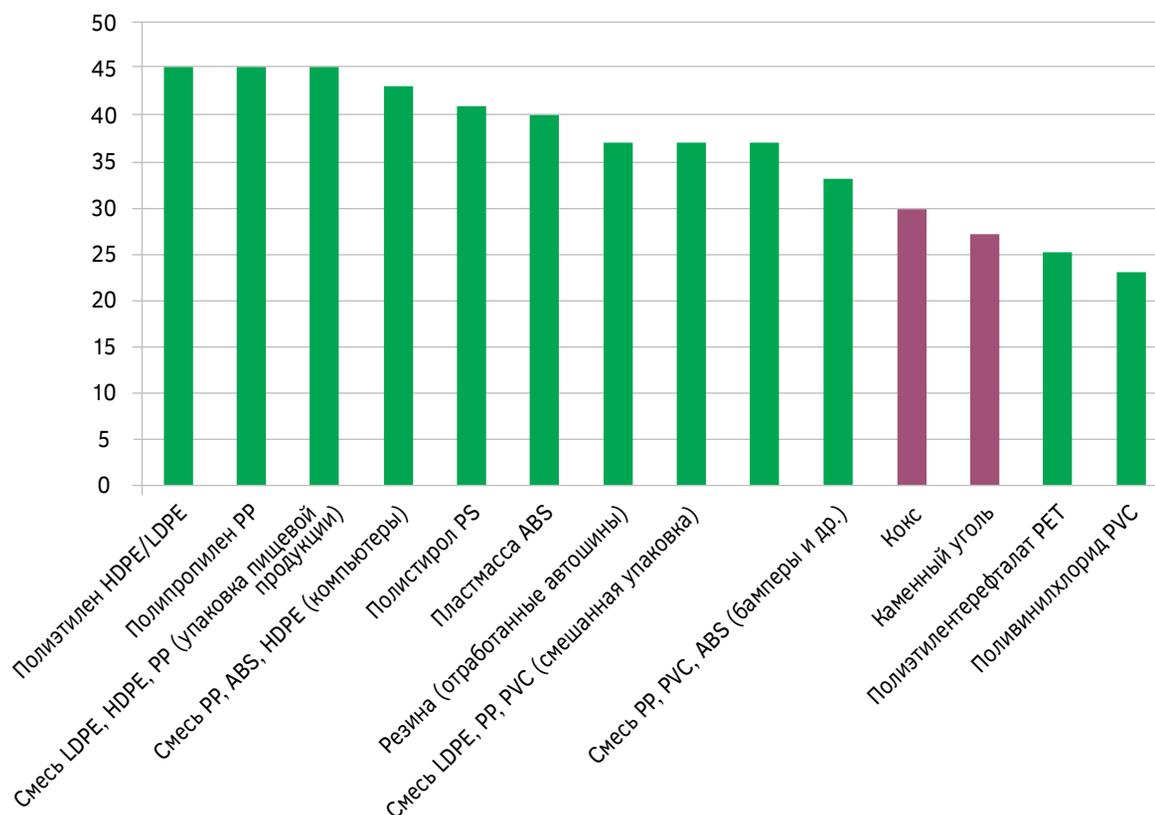


Рис. 18.9. Теплота сгорания вторичных энергоресурсов и традиционных видов топлива, МДж/кг

Представленные данные показывают, что теплота сгорания вторичных ресурсов очень высока и в ряде случаев существенно превышает теплоту сгорания таких традиционных видов топлива, как кокс и уголь.

ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Как показывает мировой опыт, 97–100% металлургических отходов может быть вовлечено в переработку. Благодаря широкому спектру технологических процессов и оборудования, металлургические предприятия имеют возможность переработать также отходы целого ряда других отраслей.

Развитие переработки вторичных ресурсов в металлургии обуславливает переход к новому этапу развития экономики — циркулярной экономике, или экономике замкнутого цикла, набирающей популярность в мире благодаря создаваемым возможностям для сокращения потребления природных ресурсов, снижения негативного экологического воздействия и появления новых видов продукции.

Переход к циркулярной экономике стимулируется на государственном уровне. Например, стимулом для вовлечения в переработку железосодержащих отходов является высокая плата за их складирование в отвалах, которая в США и Канаде, например, составляет 85–90 долл./т,

т. е. около 6000 руб./т. В России плата за размещение таких отходов, как правило, относящихся к IV классу опасности, в 2018 г. составила 663 руб./т, т. е. примерно в 9 раз ниже. Поэтому перспектива развития технологий переработки вторичных ресурсов в значительной степени зависит от мер государственного регулирования и стимулирования этого направления.

Переработка и использование шлаков в настоящее время представляют собой самостоятельную подотрасль металлургического производства. Традиционно распространенная практически во всех странах переработка доменных шлаков развивается в направлении перехода на припечную грануляцию, увеличения объемов использования гранулированного шлака в цементной промышленности, а также производства высокопрочного литого щебня для строительства шоссейных дорог, по которым движется тяжелый транспорт, и аэродромов. В производстве гранулированного шлака наиболее перспективными и эффективными являются сухие способы грануляции с использованием воздушного охлаждения или агрегатов с шаровой насадкой.

Переработка сталеплавильных шлаков развивается в направлении комплексной переработки с максимальным извлечением металла в металлопродукт, получением щебня, известковых и фосфорных удобрений для сельского хозяйства. Наиболее перспективными в технологическом, экономическом, экологическом и эксплуатационном отношении представляются технические решения, направленные на получение широкого ассортимента товарной продукции непосредственно из жидких шлаков. Наиболее эффективным является производство литого щебня (из жидких, а не отвальных шлаков), используемого в строительстве железных и автомобильных дорог, в качестве сырья для производства цемента и бетона. Стабилизация содержащейся в сталеплавильных шлаках свободной извести обеспечивается обработкой водяным паром непосредственно после выпуска.

Развитие технологий переработки мелкодисперсных отходов металлургического производства (пыли, шламы, окалина) происходит в направлении получения продукции с более высокой добавленной стоимостью — частично восстановленного или металлизированного железосодержащего сырья, а также концентратов цветных металлов, главным образом цинка.

Развивающееся во второй половине XX в. направление брикетирования металлургических пылей и шламов, в том числе горячего, в последние годы вытесняется пирометаллургическими технологиями, обеспечивающими восстановление оксидов железа и цинка. Используемые высокотемпературные агрегаты весьма разнообразны: вращающиеся трубчатые печи, печи кипящего слоя, кольцевые печи с вращающимся подом, многоподовые печи, плазменные генераторы и плазменно-дуговые печи, шахтные плавильные печи. Широкому распространению той или иной технологии препятствуют главным образом высокие капитальные и эксплуатационные затраты, а также сложность промышленного освоения. Преимущество имеют одностадийные процессы над двухстадийными. Наиболее надежными в эксплуатации и управлении являются вращающиеся трубчатые печи, которые в случае прокалки отходов с восстановителем позволяют получить высокометаллизированный продукт (губчатое железо) и цинковый концентрат (оксид цинка). Для получения металлического цинка перспективной является вельц-технология, комбинированная с выщелачиванием. Перспективным направлением является использование плазменных технологий, что обусловлено простотой управления и обслуживания, относительно низкими капитальными эксплуатационными расходами, универсальностью и возможностью исключения стадии предварительного окускования пылевидных отходов. Процессы жидкофазного восстановления железосодержащих отходов широкого промышленного распространения не получили.

Общемировым процессом является развитие металлургии на базе вторичного сырья — вторичной металлургии. Экономический рост характеризуется не только степенью использования новых материалов, малоотходных технологий, но и долей вторичного сырья в общем балансе ресурсов, показателями его утилизации. В развитых странах вторичная металлургия производит около 40% общего объема металлов. При этом, помимо вовлечения в металлургический передел вторичного железосодержащего сырья, в мире получают развитие

металлургические технологии с использованием вторичного неметаллического сырья и вторичных энергоресурсов на основе различных отходов производства и потребления.

Возможности использования в металлургии отходов без какой-либо предварительной обработки очень ограничены. В настоящее время в мире, в том числе и в России, формируется и развивается новая самостоятельная отрасль промышленности — отходоперерабатывающая, задачей которой является реализация проектов по производству на основе отходов различных видов вторичного сырья и товарной продукции, удовлетворяющих требованиям потребителей. За рубежом инвесторами таких проектов нередко выступают крупные металлургические компании, предоставляющие собственные площади и производственные мощности специализированным отходоперерабатывающим предприятиям. Результатом такого сотрудничества является полная переработка всех видов образующихся металлургических отходов, обеспечение производства новыми видами вторичного сырья и топлива, внедрение инновационных технологий с их использованием, переход на экономику замкнутого цикла, что поддерживается на государственном уровне.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Алпатова, А. А.* Исследование процессов пылеобразования при дуговом нагреве металла и свойств пыли с целью ее утилизации : дисс. на соис. уч. степ. канд. тех. наук. — М. : НИТУ МИСИС, 2016.
2. *Антоненко, Л. К.* Проблемы переработки и захоронения отходов горно-металлургического производства / Л. К. Антоненко, В. Г. Зотеев // Горный журнал. — 1999. — № 2. — С. 70–72.
3. *Баркан, М. Ш.* Перспективы утилизации отходов горнометаллургических предприятий при добыче и переработке железорудного сырья / М. Ш. Баркан, Е. И. Кабанов // Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения — 2017) : мат. Междунар. науч. конф., Красноярск, 12–15 сентября 2017 г. — Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2017. — 452 с.
4. *Близнюков, А. С.* Новейшие достижения в переработке шлака / А. С. Близнюков // Новости черной металлургии за рубежом. — 2010. — № 4. — С. 83–88.
5. *Бобович, Б. Б.* Переработка отходов производства и потребления : справочное издание / Б. Б. Бобович, В. В. Девяткин ; под ред. Б. Б. Бобовича. — М. : Интернет инжиниринг, 2000. — 496 с.
6. *Волынкина, Е. П.* Синтетические легкоплавкие флюсы для черной металлургии на основе фторуглеродистых отходов алюминиевой промышленности / Е. П. Волынкина, Е. В. Протопопов, В. В. Макачук // XI междунар. конф. «Алюминий Сибири 2005» : сб. докл. — Красноярск, 2005. — С. 289–296.
7. *Волынкина, Е. П.* Технология утилизации отработанных автомобильных покрышек при производстве стали / Е. П. Волынкина, В. П. Долгополов, В. В. Соколов // Экологический вестник Западно-Сибирского металлургического комбината : тез. докл. заводской конф. — Новокузнецк, 2004. — С. 66–67.
8. Вторичные материальные ресурсы черной металлургии / В. Г. Барышников, А. М. Горелов, Г. И. Папков : справ. — М. : Экономика, 1986. — Том 2. — 344 с.
9. *Гарабрина, Л. А.* Переработка сталеплавильных шлаков в ОАО «ММК» / Л. А. Гарабрина, Т. А. Курган, Н. С. Игнатъева. — М. : Металлург, 2000. — 101 с.
10. *Голов, С. В.* Переработка и использование техногенных отходов в ОАО «НТМК» / С. В. Голов, С. М. Ситников, Е. Г. Калимулинов // Сталь. — 2002. — № 5. — С. 96.
11. ГОСТ Р 55099–2012. Ресурсосбережение. Наилучшие доступные технологии обращения с отходами в цементной промышленности. Аспекты эффективного применения. — М. : Стандартинформ, 2013. — 18 с.
12. Государственные доклады об охране и о состоянии окружающей среды Российской Федерации // Минприроды России [официальный веб-сайт]. — URL: <http://www.mnr.gov.ru/regulatory/list.php?part=1101>.
13. *Грановская, Н. В.* Техногенные месторождения полезных ископаемых / Н. В. Грановская, А. В. Навставкин, Ф. В. Мещанинов. — Ростов-н/Д. : ЮФУ, 2013. — 93 с.
14. *Данилов, Е. В.* Современная технология утилизации сталеплавильных шлаков / Е. В. Данилов // Металлург. — 2003. — № 6. — С. 38–39.
15. *Дембицкий, Ю. В.* Технология использования в аглошихте частично подготовленных шламов металлургического производства / Ю. В. Дембицкий, Н. Т. Демура, В. П. Падалка // Металл и литье Украины. — 1997. — № 6–7. — С. 9–13.
16. *Зайцев, А. К.* Экология и ресурсосбережение в черной металлургии / А. К. Зайцев, Ю. В. Похвиснев // Соросовский образовательный журнал. — 2001. — Т. 7. — № 3. — С. 52–58.
17. *Игошев, М. В.* Переработка сталеплавильных шлаков на комбинате «Северсталь» / М. В. Игошев, Е. И. Шакуров. — М. : Металлург, 2003. — 60 с.

18. Инженерная защита окружающей среды / под ред. Ю. А. Бирмана, Н. Г. Вурдовой. — М. : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2002. — 269 с.
19. Использование теплотехнического потенциала бытовых отходов в металлургии / Е. П. Волюнкина [и др.] // IV Межд. конгресс по управлению отходами ВЭЙСТТЭК : сб. докл. — М., 2005. — С. 278.
20. Использование углеродсодержащей отработанной футеровки электролизеров в шихте доменных печей / Е. П. Волюнкина [и др.] // Современная металлургия начала нового тысячелетия : сб. науч. тр. Всеросс. конф. — Липецк. — 2001. — Ч. 2. — С. 87–88.
21. ИТС 6–2015. Производство цемента / Росстандарт. — М. : Бюро НДТ, 2015. — 305 с.
22. ИТС 25–2017. Добыча и обогащение железных руд / Росстандарт. — М. : Бюро НДТ, 2017. — 247 с.
23. Казакова, Т. И. Направления снижения энергоемкости производства черных металлов / Т. И. Казакова, А. П. Кольцова // Сталь. — 2000. — № 2. — С. 79–81.
24. Кесселер, К. Шахтная печь: отсутствие отходов у компании Thyssenkrupp Stahl / К. Кесселер // Черные металлы. — 2005. — № 7–8. — С. 34–36.
25. Корж, А. Т. Организация подготовки железосодержащих отходов и использование их в производстве агломерата / А. Т. Корж, Ю. Г. Гердий // Металл и литье Украины. — 1996. — № 9–10. — С. 38–41.
26. Кудрин, В. А. Теория и технология производства стали / В. А. Кудрин. — М. : Мир, 2003. — 528 с.
27. Курунов, И. Ф. Брэксы — новый этап в окисковании сырья для доменных печей / И. Ф. Курунов, А. М. Бижанов // Металлург. — 2014. — № 3. — С. 49–53.
28. Леонтьев, Л. И. Техногенные отходы черной и цветной металлургии и проблемы окружающей среды / Л. И. Леонтьев, В. Г. Дюбанов // Экология и промышленность. — 2011. — № 4. — С. 32–35.
29. Летимин, В. Н. Пыль и шлам газоочисток металлургических заводов и анализ путей их утилизации. Теория и технология металлургического производства / В. Н. Летимин, И. В. Макарова, М. С. Васильева, Т. М. Насыров. — 2015. — № 1 (16). — С. 82–86.
30. Лисин, В. С. Ресурсо-экологические проблемы XXI века и металлургия / В. С. Лисин, Ю. С. Юсфин. — М. : Высш. шк., 1998. — 447 с.
31. Майер, Г. Переработка пыли и шлама из газоочисток доменных и конвертерных цехов во вращающейся печи / Г. Майер, К.-Г. Фопель, В. Янссен // Черные металлы. — 1990. — № 5. — С. 3–7.
32. Металлургические методы переработки техногенного и вторичного сырья / Л. М. Симонян [и др.]. — М. : Изд-во НИТУ МИСИС, 2016. — 137 с.
33. Металлургические технологии переработки техногенных месторождений, промышленных и бытовых отходов : моногр. / С. Н. Кузнецов, Е. П. Волюнкина, Е. В. Протопопов, В. Н. Зоря. — Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2014. — 294 с.
34. Мустафин, С. К. Рециклинг отходов недропользования: проблемы и перспективы / С. К. Мустафин // Рециклинг отходов. — 2012. — № 2. — С. 2–7.
35. Набоко, Е. П. Пути утилизации отходов доменного производства / Е. П. Набоко // Актуальные вопросы современной науки. — 2013. — № 27. — С. 184–193.
36. Научно-технический прогресс в черной металлургии Японии : сб. статей. — М. : Наука, 1984. — URL: <http://nippon-history.ru/books/item/f00/s00/z0000004/index.shtml> (дата обращения: 24.10.2019).
37. Ниллс, Р. Новые тенденции в развитии металлургической технологии / Р. Ниллс // Черные металлы. — 2004. — № 10. — С. 19–25.
38. Нисидзава, С. Подход к защите окружающей среды в черной металлургии Японии / С. Нисидзава // Сталь. — 2003. — № 4. — С. 71–75.
39. Носков, В. А. Роль брикетирования в проблеме утилизации металлургических отходов / В. А. Носков // Теория и практика производства чугуна : тр. междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию КГГМК «Криворожсталь», Кривой Рог, 24–27 мая, 2004. — Кривой Рог : Изд-во КГГМК «Криворожсталь», 2004. — С. 591–594.
40. Огородникова, Е. Н. Особенности распространения и состав техногенных грунтов — отходов черной металлургии / Е. Н. Огородникова, С. К. Николаева, И. Д. Черняева // Геоэкол. Инж. геология. Гидрогеол. Геокриол. — 2000. — № 1. — С. 53–58.
41. Опыт использования в шихте доменной печи брикетов из железацинкосодержащих шламов / И. Ф. Курунов [и др.] // Металлург. — 2003. — № 10. — С. 36–38.
42. Панфилов, М. И. Металлургический завод без шлаковых отвалов / М. И. Панфилов. — М. : Металлургия, 1978. — 248 с.
43. Переработка мелкозернистых отходов металлургического производства с получением гранулированного чугуна и извлечением цинка / Н. В. Панишев [и др.] // Вестник МГУ им. Г. И. Носова. — 2013. — № 4. — С. 26–29.
44. Переработка пластмассовых отходов в коксовых печах // Новости черной металлургии за рубежом. — 2003. — № 2. — С. 31–32.
45. Переработка шлаков и безотходная технология в металлургии / М. И. Панфилов, Я. Ш. Школьник, И. В. Орнинский. — М. : Металлургия, 1987. — 238 с.
46. Письмо Координационного центра по ценообразованию и сметному нормированию в строительстве от 12 января 2018 г. № КЦ/2018-01ти «Об индексах изменения сметной стоимости строительства по Федеральным округам

- и регионам Российской Федерации на январь 2018 года» // Гарант.ру : информационно-правовой портал. — URL: <http://ivo.garant.ru/#/document/71869696/paragraph/1/doclist/0/selflink/0/highlightПисьмо%20Координационного%20центра%20по%20ценообразованию%20и%20сметному%20нормированию%20в%20строительстве%20от%2012%20января%202018%20г./> (дата обращения: 24.10.2019).
47. Применение вельц-процесса для переработки цинксодержащих пылей АО «Северсталь» / И. Н. Белоглазов [и др.] // Сб. тр. 2-го межд. симп. «Проблемы комплексного использования руд», СПГГИ (ТУ), 19–24 мая 1996 г. — СПб., 1996. — С. 190.
 48. Проблемы экологии и утилизации техногенного сырья в металлургическом производстве / Ю. С. Карабасов [и др.]. — М. : Металлург, 2004. — С. 27–33.
 49. Производство и проплавка в доменной печи брикетов нового поколения / Й. К. Далмиа [и др.] // Металлург. — 2012. — № 3. — С. 39–41.
 50. Процесс Ромелт / под ред. В. А. Роменец. — М. : Руда и металлы, 2005. — 399 с.
 51. Симонян, Л. М. Оценка и пути достижения экологической чистоты металлургического производства / Л. М. Симонян, А. А. Хилько. — М. : Изд. дом МИСиС, 2014. — С. 29.
 52. Синтетические легкоплавкие флюсы для черной металлургии на основе фторуглеродистых отходов производства алюминия / Е. П. Волынкина [и др.] // Управление отходами — основа восстановления экологического равновесия в Кузбассе : сб. докл. Первой межд. научно-практ. конф. — Новокузнецк, 2005. — С. 168–174.
 53. Сорокин, Ю. В. Переработка и использование техногенных отходов на предприятиях горно-металлургической отрасли / Ю. В. Сорокин, Л. А. Смирнов, Л. А. Шубина // Сталь. — 2005. — № 6. — С. 148–150.
 54. Сорокина, М. К. Анализ конкурентоспособности продукции черной металлургии в ценах мирового рынка / М. К. Сорокина // Бюллетень «Черная металлургия». — 2005. — № 7. — С. 51–53.
 55. Технология производства чугуна с применением металлизированных брикетов / Л. П. Брусов [и др.] // Металл и литье Украины. — 2004. — № 4. — С. 213–216.
 56. Утилизация отработанных автомобильных покрышек / Е. П. Волынкина [и др.] // Экология и промышленность России. — 1999. — № 3. — С. 16–19.
 57. Утилизация пылей и шламов в черной металлургии / А. И. Толочко [и др.]. — М. : Металлургия, 1990. — 143 с.
 58. Филипп, Т. Первый опыт работы по принципам устойчивого развития / Т. Филипп // Черные металлы. — 2001. — № 8. — С. 90–92.
 59. Филипп, Ю. А. Современное состояние и развитие охраны окружающей среды черной металлургии / Ю. А. Филипп // Черные металлы. — 2000. — № 4. — С. 26–35.
 60. Флайшандерл, А. ZEWA — новый процесс утилизации металлургических отходов / А. Флайшандерл, У. Геннари, А. Ллис // Сталь. — 2004. — № 12. — С. 118–123.
 61. Флейшандерл, А. Обращение отходов в прибыль / А. Флейшандерл, Дж. Песл, Ф. Соерт // Новости черной металлургии за рубежом. — 2002. — № 2. — С. 3–6.
 62. Черепанов, К. А. Утилизация вторичных материальных ресурсов в металлургии / К. А. Черепанов, Г. И. Черныш, В. М. Динельт. — М. : Металлургия, 1994. — 224 с.
 63. Черноусов, П. И. Рециклинг. Технологии переработки и утилизации техногенных образований и отходов в черной металлургии : монография / П. И. Черноусов. — М. : Изд. Дом МИСиС, 2011. — 428 с.
 64. Шульц, Л. А. Энерго-экологические проблемы современного металлургического комбината / Л. А. Шульц // Изв. вузов. Чер. металлургия. — 2002. — № 11. — С. 65–70.
 65. Экстракция черных металлов из техногенного сырья / В. П. Чернобровин [и др.] // Челябинск : Изд. Центр ЮУрГУ, 2013. — 173 с.
 66. Юсфин, Ю. С. Промышленность и окружающая среда / Ю. С. Юсфин, Л. И. Леонтьев, П. И. Черноусов. — М. : ИКЦ «Академкнига», 2002. — 469 с.
 67. Юсфин, Ю. С. Техногенные отходы и рециклинг / Ю. С. Юсфин // Рынок вторичных металлов. — 2002. — № 3. — С. 34–35.
 68. AMCOM L. L. C. [Официальный сайт]. — URL: <http://www.amcom-usa.com/ru/> (дата обращения: 24.10.2019).
 69. ArcelorMittal [official website]. — URL: <https://corporate.arcelormittal.com/> (accessed: 24.10.2019).
 70. Dust Recycling Ststem by the Rotary Hearth Furnace / H. Oda, T. Ibaraki, Y. Abe // Nippon Steel Technical Report. — 2006. — № 94. — P. 47–152.
 71. Integrated Pollution Prevention and Control. Reference Document on Best Available Techniques in the Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries. May 2010 / European Commission.
 72. Nanaka, M. Управление промышленными отходами в Японии. Современное состояние и проблемы / M. Nanaka, T. Ikeguchi // Koshu eisei kenkyu. Bull. Inst. Publick Health. — 1997. — Т. 46, № 4. — С. 302–309.
 73. Optimization of Integrated Steel Plant Recycling: Fine-Grain Remains and By-Products Synergy / M. Garvilovski, Z. Kamberovic, M. Filipovic, N. Majinski // Strojarstvo. — 2011. — № 53 (5). — P. 359–365.
 74. Sehiselo, Ndlow. Waste Production and Utilization in the Metal Eaxtraction Industry / Sehiselo Ndlow, G. S. Simate, E. Matinde. — CRC Press, 2017. — 512 p.

ВТОРИЧНЫЕ РЕСУРСЫ, ОБРАЗУЮЩИЕСЯ В ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Евгений Леонидович Торочков

АО «Научно-исследовательский институт по удобрениям и инсектофунгицидам имени профессора Я. В. Самойлова», начальник Комплексного отдела международных связей, научно-технической информации и промышленной экологии

Андрей Иванович Ряшко

Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики», зам. начальника отдела методологии ресурсосбережения, кандидат технических наук

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время химическая промышленность России включает в себя горнохимическую промышленность, производство основных химических веществ, удобрений и азотных соединений, пластмасс и синтетического каучука в первичных формах, пестицидов и прочих агрохимических продуктов, лаков и красок, мыла и моющих средств, парфюмерных и косметических средств, взрывчатых веществ, клеев, химических волокон и прочих химических продуктов.

Образование вторичных материальных ресурсов в химической промышленности России составляет около 78 млн т в год; при этом 79,5% приходится на горнохимическую промышленность, включающую в себя производство апатитового концентрата, хлористого калия, различных минеральных солей. Уровень использования вторичных материальных ресурсов, образующихся в химической промышленности, составляет ~44% от их ежегодного образования.

Горнохимическая промышленность ежегодно образует около 62 млн т вторичных материальных ресурсов (без учета вскрышных и вмещающих пород, которые в свою очередь также представляют ресурсную ценность), в том числе около 31,0 млн т галитовых отходов, около 24,5 млн т хвостов обогащения апатит-нефелиновых руд и около 1,8 млн т глинисто-солевых шламов.

В результате производства фосфорных и комплексных удобрений, неорганических кислот и солей, пластмасс, синтетического каучука и прочих химических продуктов ежегодно образуется около 16 млн т вторичных материальных ресурсов, в том числе около 12,5 млн т фосфогипса (в пересчете на сухой дигидрат сульфата кальция), около 1,0 млн т вторичных материальных ресурсов производства кальцинированной соды, около 0,5 млн т конверсионного мела.

Безусловно, было бы верхоглядством в рамках небольшой статьи попытаться сделать краткий обзор того потенциала, который кроется во вторичных материальных ресурсах, образующихся в химической промышленности. Даже если рассматривать лишь крупнотоннажные вторичные материальные ресурсы, то и тогда результат бы оказался крайне поверхностным и не дал бы возможности уважаемому читателю сформировать целостное представление о той ценности, которая таится во вторичных ресурсах. Поэтому авторы решили ограничиться рассмотрением лишь одного крупнотоннажного вторичного ресурса, а именно — фосфогипса, который образуется при производстве экстракционной фосфорной кислоты.

КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ВОПРОСА

Ведение интенсивного сельского хозяйства подразумевает использование относительно большого количества удобрений. Особую роль в восстановлении плодородия почв играют фосфорсодержащие минеральные удобрения, благодаря использованию которых осуществляется регулирование фосфатного режима почв. На сегодняшний день львиная доля фосфорсодержащих минеральных удобрений производится на основе экстракционной фосфорной кислоты (ЭФК).

В процессе производства ЭФК сернокислотным способом образуется дигидрат ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) либо полугидрат сульфата кальция ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$), которые из-за наличия примесных соединений фосфора называют фосфогипсом и фосфополугидратом соответственно. Однако при рассмотрении вопросов транспортирования, складирования и использования оба вторичных материальных ресурса обычно именуют фосфогипсом.

При получении 1 т P_2O_5 в ЭФК образуется от 4,2 до 6,5 т фосфогипса (в пересчете на сухой дигидрат сульфата кальция) в зависимости от качества перерабатываемого фосфатного сырья.

Начало промышленного получения ЭФК связано с системой Дорра, когда разложение фосфатного сырья осуществлялось в реакторах Дорра посредством перемешивания пульпы сжатым воздухом, а затем полученную пульпу декантировали и промывали непрерывно в системе сгустителей Дорра. В 1917–1929 гг. было построено более 20 таких установок, производительность которых, как правило, составляла около 25–50 т P_2O_5 в ЭФК в сутки. На протяжении 1920–1950-х гг. были проведены фундаментальные исследования физико-химических основ получения ЭФК и разработан ряд технологических приемов, обеспечивших в конце 1950-х — начале 1960-х гг. внедрение крупнотоннажных непрерывных способов получения ЭФК. С этого времени начинается получение концентрированных фосфорсодержащих минеральных удобрений в больших объемах.

Проблема использования фосфогипса в народнохозяйственных целях встала перед исследователями уже на этапе разработки процессов получения ЭФК. Однако внедрению разрабатываемых технологических процессов переработки фосфогипса чаще всего препятствовала широкая распространенность и дешевизна природного гипса.

Ввиду роста численности народонаселения Земли и необходимости удовлетворения его потребностей в сельскохозяйственной продукции производство фосфорсодержащих минеральных удобрений к настоящему времени достигло поистине гигантских размеров, что привело к побочному образованию фосфогипса в крупнотоннажных масштабах.

На рис. 19.1 представлено развитие мирового производства фосфогипса и степень его использования за последние полвека.

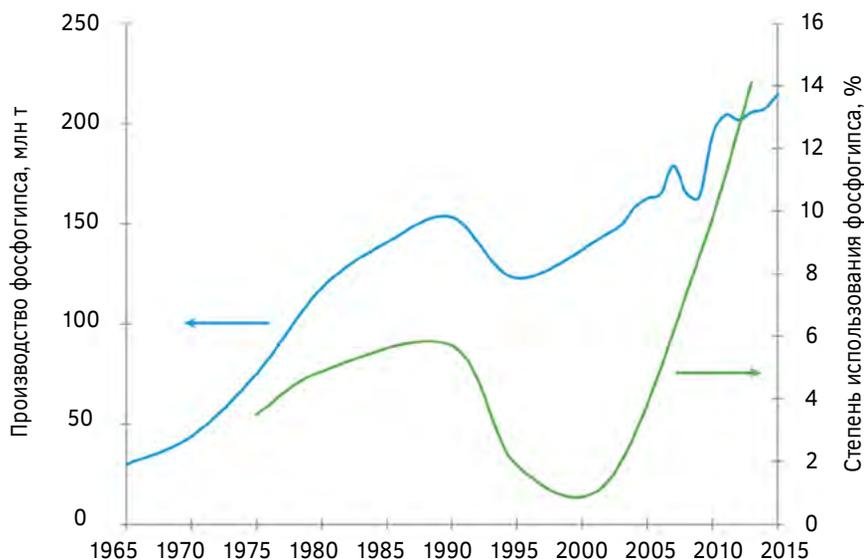


Рис. 19.1. Мировое производство фосфогипса и степень его использования

В России в настоящее время развитие мощностей по производству ЭФК привело к тому, что ежегодное образование фосфогипса (в пересчете на сухой дигидрат сульфата кальция) достигло 12,5 млн т. Использование же фосфогипса в последние годы в среднем составляет около 1% от его образования.

На рис. 19.2 приведена карта-схема расположения отечественных предприятий по производству ЭФК и фосфогипса.

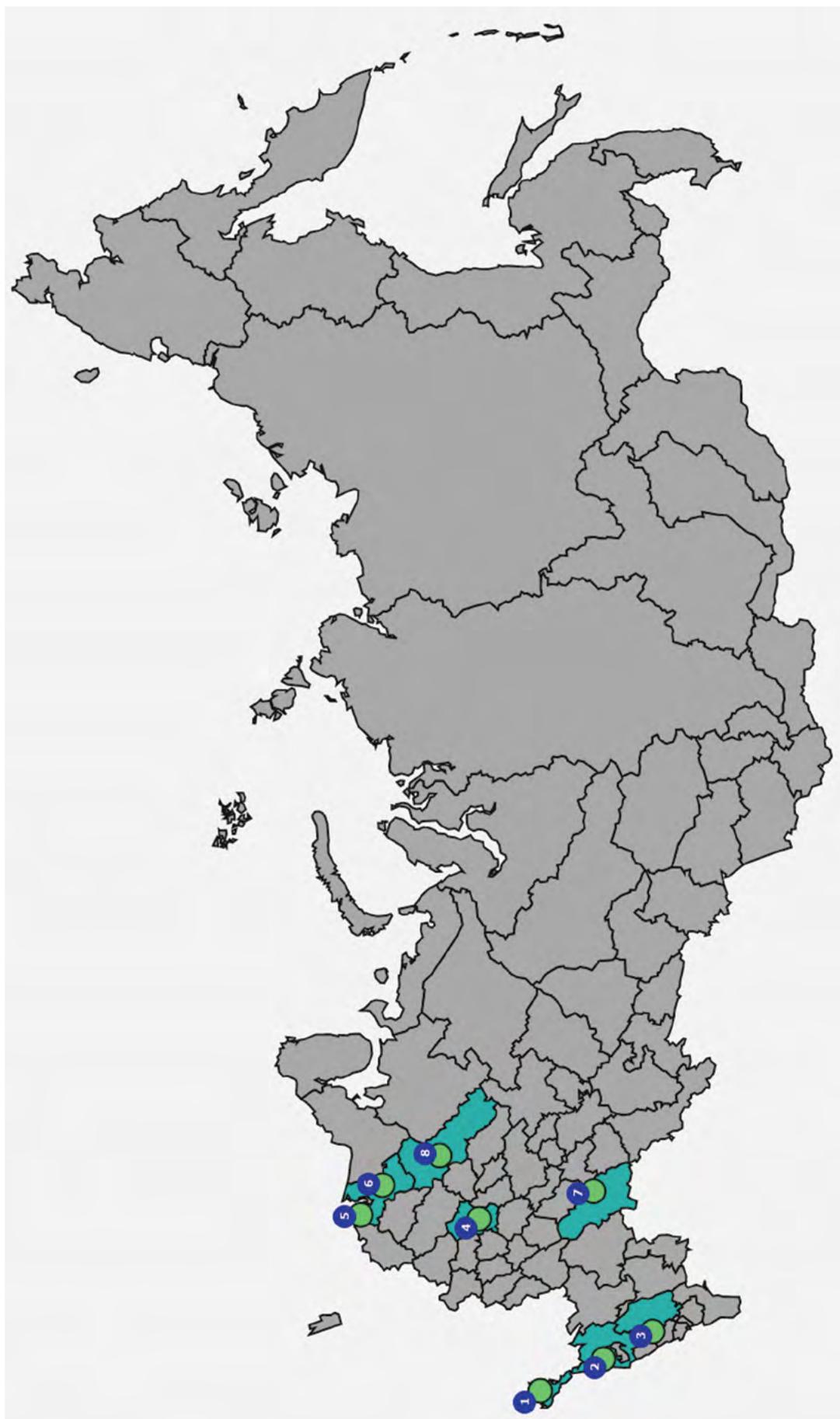


Рис. 19.2. Карта-схема расположения предприятий Российской Федерации, в результате деятельности которых образуется фосфогипс:

1 — Армянский филиал ООО «Титановые инвестиции»; 2 — ООО «ЕвроХим — Белореченские минудобрения»; 3 — ОАО «Гидрометаллургический завод»; 4 — АО «Воскресенские минеральные удобрения»; 5 — ООО «Промышленная группа «Фосфорит»; 6 — Волховский филиал АО «Апатит»; 7 — Балаковский филиал АО «Апатит»; 8 — АО «Апатит»

НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ПЕРЕРАБОТКИ ФОСФОГИПСА

К настоящему времени проведено большое количество научно-исследовательских и опытных работ по различным направлениям непосредственного использования фосфогипса и переработки его в другие продукты. Доказана техническая возможность и целесообразность использования фосфогипса в народном хозяйстве вместо традиционных видов сырья. Можно выделить основные направления использования фосфогипса.

1. Производство гипсовых вяжущих и изделий из них:
 - 1.1) высокопрочные и композиционные автоклавные гипсовые вяжущие на основе α -полугидрата сульфата кальция или ангидрита, которые используются:
 - в строительстве: непосредственное использование вяжущих с добавками и без оных, в качестве штукатурного и шпаклевочного материала, для наливных самонивелирующихся оснований под полы, для производства строительных изделий (перегородочные плиты и панели, акустические и декоративные плиты, кирпичи и блоки для наружного ограждения зданий и др.);
 - в шахтах угольной и других отраслей промышленности: заполнение закрепного пространства и выкладка охранных полос при бесцеликовой добыче;
 - в низкотемпературных скважинах в нефтегазовой промышленности и в геологии: изготовление тампонажного цемента;
 - 1.2) обжиговые вяжущие на основе β -полугидрата сульфата кальция, которые используются в строительстве: в качестве штукатурного и шпаклевочного гипса, для производства строительных изделий (перегородочные плиты и панели, гипсокартонные листы, гипсоволокнистые и гипсостружечные плиты, звукопоглощающие и декоративные плиты и др.).
2. Цементная промышленность:
 - 2.1) добавка к сырьевой смеси в качестве минерализатора;
 - 2.2) добавка к цементному клинкеру перед его помолем в качестве регулятора сроков схватывания цемента.
3. Сельское хозяйство:
 - 3.1) кальцийсеросодержащее удобрение;
 - 3.2) добавка при получении органоминеральных удобрений методом компостирования;
 - 3.3) мелиорант для химической мелиорации солонцовых почв;
 - 3.4) мелиорант в смеси с известковыми материалами для химической мелиорации кислых почв.
4. Производство серной кислоты с попутным получением ряда продуктов (цемент, известь, силикатные материалы).
5. Производство строительных изделий с использованием непереработанного фосфогипса:
 - 5.1) блоки и панели, получаемые из смеси с летучей золой (из электрофильтров) и известью;
 - 5.2) кирпичи, получаемые прессованием фосфогипса в смеси с гипсовым вяжущим;
 - 5.3) изделия из фосфогипса и органических связующих (к примеру, карбамидной смолы).
6. Производство удобрений и солей:
 - 6.1) сульфат аммония и мел;
 - 6.2) сульфат калия и мел;
 - 6.3) NS-удобрения (в смеси с карбамидом или нитратом аммония);
 - 6.4) комплексные серосодержащие удобрения: NPS-, NPKS-, PKS-удобрения.
7. Применение в качестве наполнителя в различных отраслях промышленности: в производстве бумаги, в лакокрасочной промышленности, в производстве пластмасс и др.
8. Строительство автомобильных дорог.

Несмотря на широкий спектр областей применения фосфогипса, образование оно в больших количествах с учетом затрат на транспортировку, необходимости в ряде случаев проведения его очистки от загрязняющих примесей и конкуренции с традиционно используемыми природными ресурсами приводит к ограниченности рынка сбыта фосфогипса и продуктов его переработки.

Производство гипсовых вяжущих и изделий из них

Фосфогипс представляет собой химически осажденный гипс, образующийся при производстве ЭФК, вследствие чего содержит примеси в виде соединений фосфора¹. Поэтому вполне логично, что одним из наиболее проработанных направлений переработки фосфогипса является производство из него гипсовых вяжущих и изделий из них. При этом, как и при переработке природного гипсового камня, следует отдельно рассмотреть производство гипсовых вяжущих на основе β -полугидрата сульфата кальция и α -полугидрата сульфата кальция.

Для производства гипсовых вяжущих с хорошими характеристиками содержание технологических примесей в фосфогипсе должно быть минимальным, поэтому образующийся в одностадийных процессах получения ЭФК фосфогипс требует проведения дополнительной подготовки в виде промывки и (или) нейтрализации. Основными мешающими примесями являются водорастворимые фосфаты. Детальными исследованиями установлено, что максимальное содержание водорастворимых соединений фосфора в пересчете на P_2O_5 (далее — P_2O_5 (вод.)) не должно превышать 0,4%. При этом потребитель часто предъявляет более строгие условия — не более 0,2% P_2O_5 (вод.).

Следует отметить, что при использовании двухстадийных процессов получения ЭФК образуется значительно более чистый фосфогипс по сравнению с одностадийными процессами, что позволяет отказаться от дополнительной подготовки фосфогипса и тем самым удешевить его переработку в гипсовые вяжущие. Так, более чем полувековой опыт эксплуатации в Японии и Бельгии полугидратно-дигидратных и дигидратно-полугидратных способов производства ЭФК являются тому прекрасным подтверждением.

Существенное влияние на технико-экономические показатели производства гипсовых вяжущих из фосфогипса оказывает повышенное содержание в нем свободной влаги, что порождает необходимость в более высоком расходе тепла, чем при использовании природного гипсового камня.

Гипсовые вяжущие на основе β -полугидрата сульфата кальция

В основном методы получения гипсовых вяжущих на основе β -полугидрата сульфата кальция из фосфогипса аналогичны тем, что используются при переработке природного гипсового камня. Чаще всего отличие заключается лишь в узлах подготовки и подачи фосфогипса на сушку исходного сырья для дальнейшего обжига в гипсоварочных котлах или барабанных печах.

Для повышения экономических преимуществ переработки фосфогипса как вторичного материального ресурса практически все промышленные установки по переработке его в гипсовые вяжущие строились в непосредственной близости к местам его образования, то есть к местам расположения предприятий по производству ЭФК.

Подготовка фосфогипса, как это уже указывалось выше, заключается в его промывке водой и (или) нейтрализации. Нейтрализацию обычно проводят известковым молоком.

Узел подачи фосфогипса в сушилку должен учитывать его мелкодисперсную структуру и повышенную влажность, так как указанное приводит к налипанию материала к стенкам бункеров.

¹ При переработке отечественного фосфатного сырья общее содержание фосфатов в фосфогипсе при устойчивом технологическом режиме не превышает 1,2–1,5% P_2O_5 ; здесь и далее, когда речь идет о содержании примесей в фосфогипсе, по умолчанию данные приводятся в пересчете на абсолютно сухое вещество.

После сушки фосфогипс подают на обжиг в гипсоварочный котел или барабанную печь. Обжиг осуществляется при температуре 110–170°С по следующей реакции:



Схема получения из фосфогипса гипсовых вяжущих на основе β-полугидрата сульфата кальция с обжигом в барабанной печи представлена на рис. 19.3.

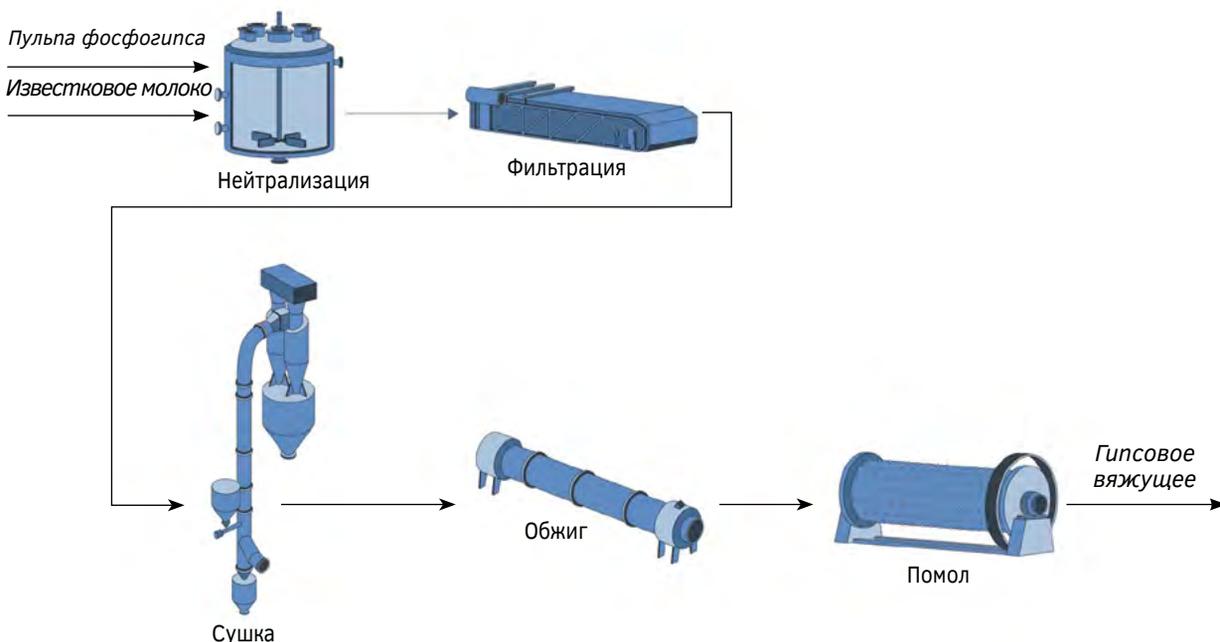


Рис. 19.3. Схема получения из фосфогипса гипсовых вяжущих на основе β-полугидрата сульфата кальция с обжигом в барабанной печи

Гипсовые вяжущие на основе α-полугидрата сульфата кальция

Если классическая схема получения гипсовых вяжущих на основе α-полугидрата сульфата кальция из природного гипсового камня подразумевает использование демпфера, где происходит запарка окускованного гипса под давлением, то переработку фосфогипса проводят в автоклаве под давлением при перемешивании в растворах, содержащих различные добавки. Часто в качестве добавки подразумевается обязательное использование модифицирующего регулятора кристаллизации α-полугидрата сульфата кальция.

После тепловой обработки в автоклаве при 120–150°С кристаллы α-полугидрата сульфата кальция отделяются на фильтре от жидкой фазы и направляются на сушку в сушильный барабан.

Схема получения из фосфогипса автоклавных гипсовых вяжущих на основе α-полугидрата сульфата кальция приведена на рис. 19.4.

Исходная относительно высокая влажность фосфогипса и его дисперсный состав являются предпосылками для выбора именно автоклавного метода переработки фосфогипса перед обычным обжигом фосфогипса при атмосферном давлении. Автоклавная обработка фосфогипса не требует испарения содержащейся в исходном сырье свободной и выделяющейся при дегидратации кристаллизационной воды. Испарять в этом случае требуется лишь свободную влагу, которая остается после фильтрации α-полугидрата сульфата кальция, что значительно меньше, чем при обжиговых способах переработки фосфогипса.

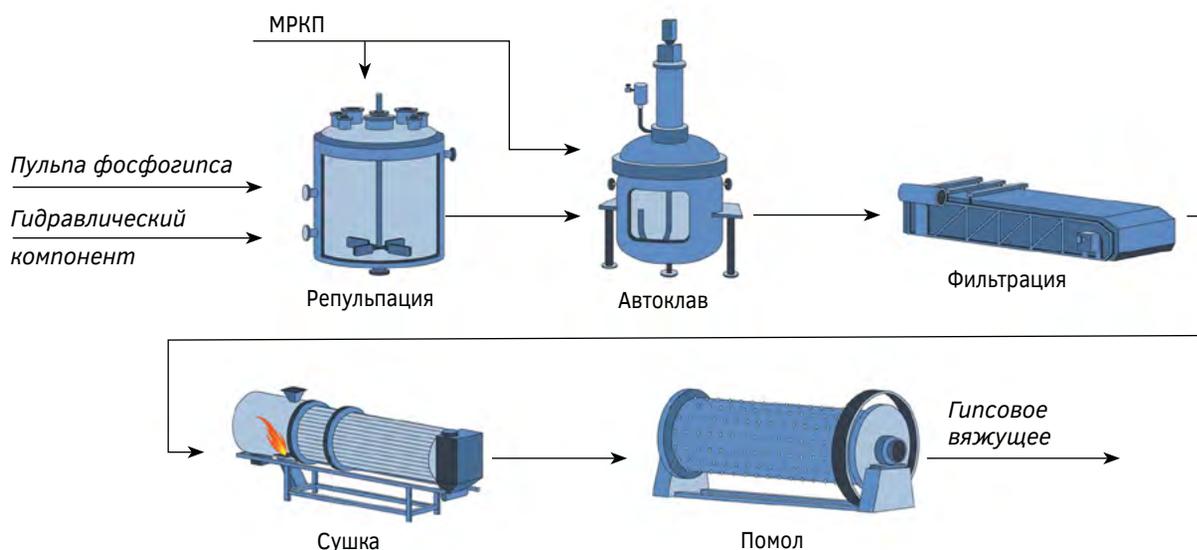


Рис. 19.4. Схема получения из фосфогипса автоклавных гипсовых вяжущих на основе α -полугидрата сульфата кальция, где МРКП — модифицирующий регулятор кристаллизации полугидрата

Производство цемента

Фосфогипс при производстве цемента используется в качестве минерализатора при приготовлении шихты перед обжигом и в качестве регулятора сроков схватывания при помоле цемента взамен природного гипса.

В качестве минерализатора фосфогипс добавляется к исходной шихте для интенсификации обжига цементного клинкера. Добавка фосфогипса к сырьевой шихте в количестве 2–3% от массы сухого шлама (содержание SO_3 в смеси до 1%) позволяет повысить стойкость футеровки обжиговой печи и незначительно снизить расход топлива.

Однако применение фосфогипса возможно не на всех цементных заводах, поскольку минерализующие свойства фосфогипса непосредственно связаны со свойствами и составом сырьевых материалов, используемых тем или иным предприятием.

Значительно чаще фосфогипс используется в качестве регулятора сроков схватывания цемента посредством добавки фосфогипса в клинкер перед помолом. Этот способ использования предъявляет более жесткие требования к производственному фосфогипсу. В первую очередь к его химическому составу, а во вторую — к его физико-механическим свойствам. Содержание фосфатов в фосфогипсе должно удовлетворять следующим критериям: содержание водорастворимых соединений фосфора — не более 0,5% P_2O_5 , а общее содержание фосфатов — не более 1,2% P_2O_5 . При более высоком содержании фосфатов полная замена природного гипса фосфогипсом не представляется возможной, так как при этом качество цемента не будет удовлетворять необходимым требованиям.

Для стабильного получения фосфогипса требуемого качества его необходимо дополнительно отмыть водой и (или) смешать с известковым компонентом (известь, мел). Фосфогипс, образующийся в двухстадийных процессах получения ЭФК (дигидратно-полугидратный или полугидратно-дигидратный), полностью пригоден для использования в производстве цемента в качестве заменителя природного гипса.

Для удобства введения фосфогипса в процесс производства цемента, а также для повышения транспортабельности фосфогипса потребитель зачастую предъявляет дополнительные требования, которые заключаются в том, чтобы поставка фосфогипса осуществлялась в гранулированном (или окускованном) виде. При этом следует отметить, что на основе

многолетнего опыта использования фосфогипса в Японии с целью экономии энергоресурсов в конечном итоге отказались от гранулирования фосфогипса.

На рис. 19.5 приведена схема сухого способа получения цемента с использованием фосфогипса, на которой представлено два варианта введения фосфогипса в систему.

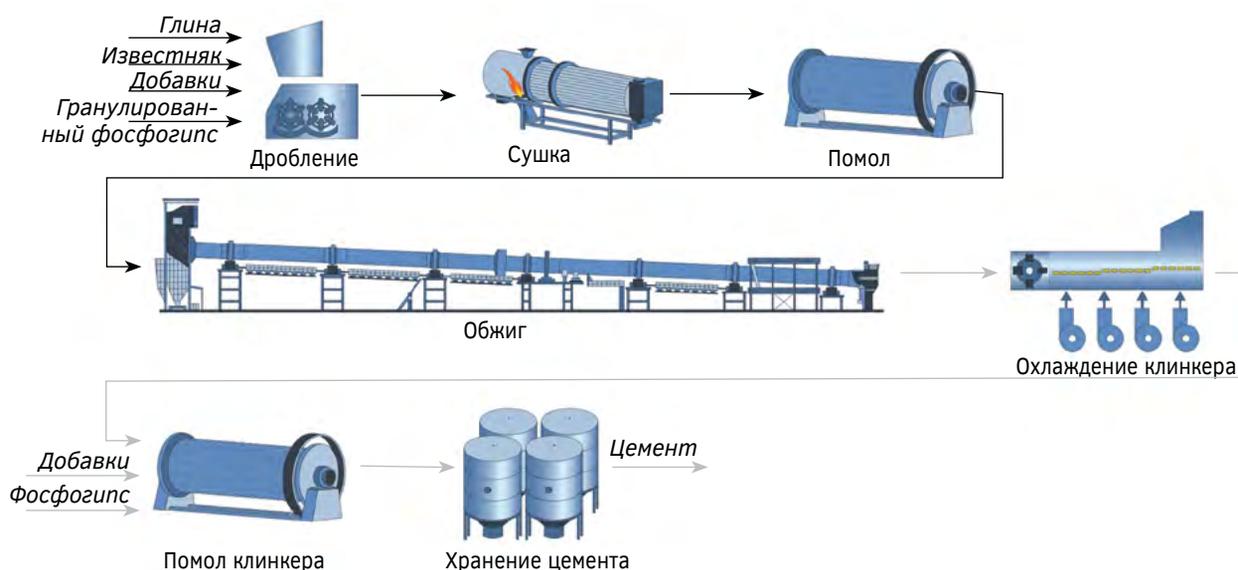
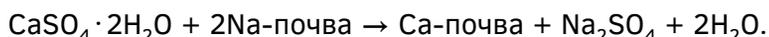


Рис. 19.5. Схема сухого способа получения цемента с использованием фосфогипса

Использование в сельском хозяйстве

Фосфогипс используется в сельском хозяйстве в качестве кальцийсеросодержащего удобрения на почвах с недостатком кальция и серы, в качестве добавки при получении органоминеральных удобрений методом компостирования, в качестве мелиоранта для химической мелиорации солонцовых почв и в качестве мелиоранта в смеси с известковыми материалами для химической мелиорации кислых почв.

Особое значение имеет использование фосфогипса для мелиорации солонцовых почв, которая проводится для оптимизации карбонатно-кальциевого равновесия почвенного раствора. Внесение $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ в солонцовую почву приводит к вытеснению из поглощающего комплекса почв ионов натрия и замене их ионами кальция:



Обычное гипсование солонцовых почв давно зарекомендовало себя как эффективный метод восстановления их плодородия, улучшения агропроизводственных свойств почв. В ходе многочисленных исследований в различных климатических зонах установлено, что мелиорирующее действие природного гипса и фосфогипса равноценно.

Количество вносимого в почву фосфогипса зависит от почвенных и агроклиматических условий природно-климатических зон и составляет от 2,5 до 15 т/га. Последствия мелиорации могут длиться 7–20 лет, после чего снова требуется проведение химической мелиорации.

Подготовка фосфогипса к непосредственному использованию в сельском хозяйстве проста и состоит из трех основных этапов (рис. 19.6). На первом этапе происходит размещение влажного фосфогипса на специально подготовленных открытых площадках. На втором этапе проводится вылеживание фосфогипса с целью уменьшения его влажности в естественных условиях: при размещении $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ лишняя вода, находящаяся в свободном состоянии, уходит под действием гравитационных сил, а при размещении $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ дополнительно

происходит его перекристаллизация в $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Иногда вылеживание фосфогипса сопровождается периодическим рыхлением материала; это особенно актуально при размещении фосфополугидрата. Третий этап заключается в разработке штабелей или отвалов фосфогипса для его последующей отгрузки потребителю.

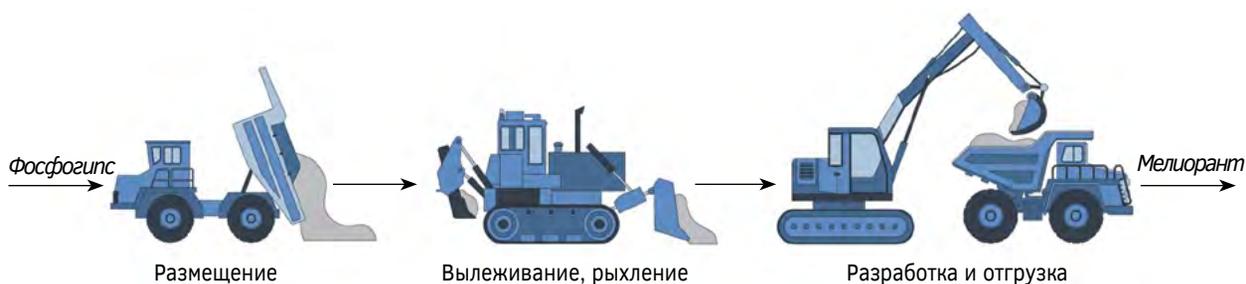


Рис. 19.6. Схема подготовки фосфогипса для использования в сельском хозяйстве

Рекуперация серы из фосфогипса

Потребность в рекуперации серы из фосфогипса обусловлена в первую очередь тенденциями на мировом рынке серы. До середины 1980-х гг. стоимость серы как одного из трех основных компонентов для производства концентрированных азотно-фосфорных удобрений составляла значительную часть себестоимости продуктов. Позже, с появлением больших количеств элементной серы, получаемой при очистке природного газа и нефти, а также дешевой серной кислоты металлургической промышленности, стоимость серы сильно упала, и она превратилась в самый дешевый компонент. Современные предприятия по производству минеральных удобрений, получающих серную кислоту из элементной серы, имеют дополнительные преимущества в виде тепла и электроэнергии, вырабатываемых попутно при сжигании серы и при абсорбции SO_3 .

При увеличении спроса на серу в мире возрастает интерес и к рекуперации серы из фосфогипса. В регионах, где доступность элементной серы ограничена или где накопление фосфогипса ограничивается законодательно, восстановление серы из фосфогипса более актуально.

На потребность производства сульфата аммония из фосфогипса влияет объем доступного сульфата аммония, производимого в качестве побочного продукта коксохимическими производствами и нарастающими производствами капролактама.

Производство серной кислоты с получением строительных материалов

Производство серной кислоты и цемента. Процесс получения серной кислоты и портландцемента при переработке фосфогипса аналогичен процессу Мюллера-Кюне, разработанному для получения данных продуктов из природного ангидрида (технология впервые реализована в Германии на предприятии в городе Леверкузен в 1916 г.). Всего в период с 1916 по 1988 г. по всему миру было построено 25 таких установок. Почти все они располагались в Западной Европе, исключение составляли две установки, запущенные в эксплуатацию в Китае и ЮАР. Их производительность варьировалась от 40 до 520 т в сутки в пересчете на моногидрат (то есть на H_2SO_4).

Циклический процесс с рекуперацией серной кислоты из сульфата кальция и повторным ее использованием для получения ЭФК на первый взгляд выглядит чрезвычайно привлекательным. Но из-за высокой себестоимости продукции (в 2–3 раза выше, чем из элементной серы) и высоких капитальных затрат в настоящее время данный процесс практически не применяется. Так, введенные в 60–70-х гг. XX в. в эксплуатацию производства серной

кислоты и цемента из фосфогипса в основном были закрыты или перепрофилированы. Китай в настоящее время продолжает успешно эксплуатировать комбинированные схемы получения серной кислоты и цемента из фосфогипса благодаря государственной поддержке этих проектов.

Комбинированный процесс получения SO_2 и цементного клинкера или извести из фосфогипса основан на следующей суммарной химической реакции термического разложения фосфогипса:



Получаемый SO_2 направляют на доокисление до SO_3 и затем получение серной кислоты. Технологическая схема производства серной кислоты в данном случае аналогична производству серной кислоты из элементарной серы. Но с учетом того, что концентрация SO_2 во входящем потоке составляет всего около 6% (при сжигании серы значение этой величины составляет 11–12%) на входе в контактный аппарат, установка по производству серной кислоты будет намного крупнее и дороже. Схема производства SO_2 -содержащего газа и цементного клинкера из фосфогипса приведена на рис. 19.7.

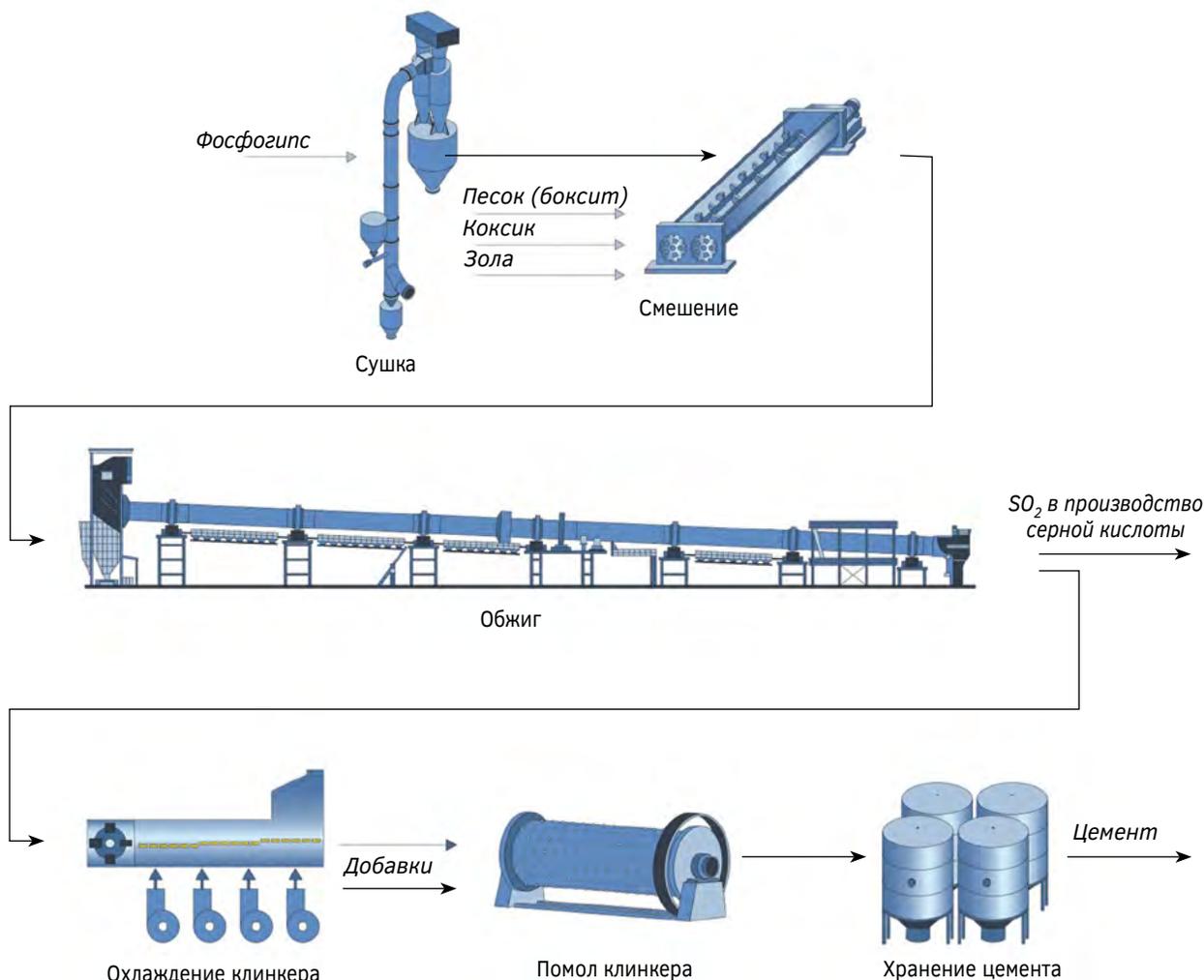


Рис. 19.7. Схема получения SO_2 и цементного клинкера из фосфогипса

Перед переработкой фосфогипс промывают (при необходимости) и сушат до содержания свободной влаги не более 6%. В качестве добавок используется глина или летучая зола бурого угля, а при недостаточном содержании в глине Al_2O_3 добавляют боксит, песок, колчеданный огарок. Восстановителем служит коксик. Компоненты шихты сушат и подвергают размолу, полученную сырьевую смесь гомогенизируют.

Обжиг сырьевой смеси с получением сернистого газа и клинкера ведут во вращающейся обжиговой печи. Перед подачей в печь сырьевая смесь подогревается газами, отходящими из печи в преднагревателе. Клинкер охлаждают на противоточном рекуператоре или выносном колосниковом холодильнике.

Обжиговой газ проходит очистку от пыли в сухом электрофилт্রে, от соединений фтора при промывке водой и от тумана серной кислоты в мокром электрофилт্রে, затем он направляется на установку получения серной кислоты.

Клинкер подвергают размолу с добавкой гипса (или фосфогипса) как регулятора сроков схватывания цемента.

Разработан способ получения SO_2 и цементного клинкера из фосфогипса при термической обработке сырьевой шихты в три стадии (разработка компании «Lurgi» — ныне «Outotec»). На первой стадии смесь прокаливают в печи непрямого нагрева с добавлением серной кислоты, при этом происходит удаление соединений фтора. Затем шихту подают в печь циркулирующего кипящего слоя, где происходит разложение фосфогипса. Отходящие SO_2 -содержащие газы направляют в качестве теплоносителя на предыдущую стадию термообработки, а затем после очистки от пыли — в производство серной кислоты. На третьей стадии сухой остаток направляют в относительно короткую вращающуюся печь обжига (спекания).

По данным разработчиков процесса, при использовании предложенной технологии в сравнении с процессом Мюллера — Кюне удельный расход тепла снижается на 30%, электроэнергии — на 40%, снижается также и стоимость обслуживания.

Производство серной кислоты и извести. Производство извести и серной кислоты при термическом разложении фосфогипса, по сути, аналогично процессу Мюллера — Кюне, в котором берется твердый восстановитель. При использовании же газообразного восстановителя в основе процесса лежат следующие реакции:



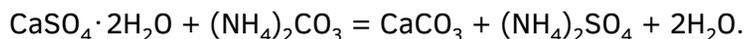
Разработанные технологии предполагают проведение процесса во вращающейся печи либо, что более предпочтительно, в печи кипящего слоя с использованием газообразного восстановителя. При организации оптимального технологического режима степень разложения фосфогипса составит 96–97%, при этом можно получить сернистый газ с концентрацией SO_2 до 10–12%. Получаемая известь, содержащая 73–76% $CaO_{(акт.)}$, может найти применение на том же предприятии по производству минеральных удобрений и использоваться при нейтрализации фторсодержащих кислых стоков.

Производство серной кислоты с промежуточным получением элементной серы

Все изученные и разработанные процессы получения элементной серы из фосфогипса основаны на термическом восстановлении фосфогипса до CaS или $Ca(HS)_2$ с использованием различных восстановителей. Таким восстановителем может служить углерод (коксик или древесный уголь) или продукты конверсии метана — CO и H_2 . Далее CaS или $Ca(HS)_2$ конвертируют с помощью CO_2 и H_2O в H_2S и $CaCO_3$. Сероводород направляют в установку получения элементной серы по методу Клауса.

Производство сульфата аммония

Углеаммонийная конверсия фосфогипса с получением конверсионного мела. Процесс получения сульфата аммония по реакции конверсии гипса известен более 150 лет. Процесс углеаммонийной конверсии гипса протекает по реакции:



Теорией вопроса впервые занялся немецкий ученый В. Нейман, который на основании растворимости $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и CaCO_3 установил константу этой реакции, а также вычислил теоретический выход для разных концентраций карбоната аммония при разных температурах. По расчетам В. Неймана теоретический выход (степень превращения) по аммиаку при температуре 18°С составляет 99,97%. Процесс конверсии был исследован для $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ и CaSO_4 . Установлено, что наибольший выход по продуктам реакции достигается для $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ как наиболее растворимой формы сульфата кальция.

В иностранной литературе рассматриваемый процесс известен как Мерзбург-процесс (в соответствии с названием города в Германии, в котором он был изобретен в середине XIX в.). К фосфогипсу данный процесс был промышленно применен в 1960-х гг. с целью получения $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Побочным продуктом конверсии является CaCO_3 (карбонатный шлам), который может применяться в различных отраслях промышленности, например, в производстве цемента или в сельском хозяйстве. Примечательно, что описываемый процесс сегодня может рассматриваться как способ связывания сбросного углекислого газа с целью снижения промышленных выбросов CO_2 .

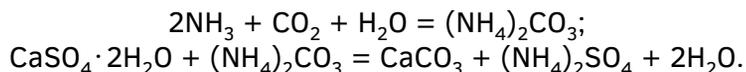
Технико-экономические показатели процесса конверсии фосфогипса и качество получаемых продуктов определяются рядом основных факторов:

- содержание примесей в фосфогипсе и необходимость его дополнительной очистки;
- доступность источников углекислого газа и его концентрации;
- выбранная технология конверсии фосфогипса («жидкостная», «газовая», «газожидкостная») и параметры ведения процесса.

Так, для получения хорошо фильтруемого осадка исходный фосфогипс должен содержать как можно меньше растворимых фосфатов — не более 1,5% P_2O_5 . Поэтому для улучшения процесса фосфогипс дополнительно промывают на фильтре или репульпируют в воде с повторным фильтрованием. Нежелательно также наличие соединений магния, алюминия и железа, которые ухудшают фильтруемость карбонатного шлама.

Повышению степени конверсии фосфогипса способствует увеличение на 5–15% расхода раствора карбоната аммония или NH_3 и CO_2 , подаваемых в газообразном виде. При значительном избытке карбонат аммония разлагается, и его абсорбируют растворами серной кислоты, при этом растет норма расхода серной кислоты.

Большая часть реализованных на практике технологических схем основана на так называемом «жидкостном» методе. В основе процесса «жидкостной» конверсии фосфогипса лежат следующие химические реакции:



Технологическая схема, как правило, включает следующие стадии: подготовка сырья (репульпация и фильтрация фосфогипса); приготовление раствора $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ в колоннах карбоаммонизации; стадия конверсии в специальных смесителях; созревание карбонатной пульпы в каскаде реакторов (время кристаллизации ~4–5 часов; температура кристаллизации — 50–55°С); фильтрация и промывка карбонатного шлама (съем осадка по сухому CaCO_3 —400–450 кг/м² в час); очистка производственного раствора от взвеси карбонатного шлама; нейтрализация избыточной щелочности серной кислотой. Для получения

кристаллического $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ фильтрат упаривают, подвергают кристаллизации, центрифугируют и сушат. Блок-схема процесса представлена на рис. 19.8.

Преимуществом данной схемы является высокий выход $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ и возможность получения хорошо фильтруемого и отмытого карбонатного шлама. Также к преимуществам можно отнести более простое аппаратное оформление и меньшие потери газов на стадии конверсии. Недостаток процесса заключается в необходимости отвода тепла из карбоаммонизационной колонны, так как реакция аммиака с углекислотой является экзотермической. В то же время процесс конверсии является эндотермическим, и для поддержания оптимальной температуры реакционной смеси карбонатную пульпу необходимо дополнительно подогреть. К недостаткам «жидкостного» метода также относят потребность в дополнительных площадях и технологическом оборудовании по сравнению с «газовым» методом.

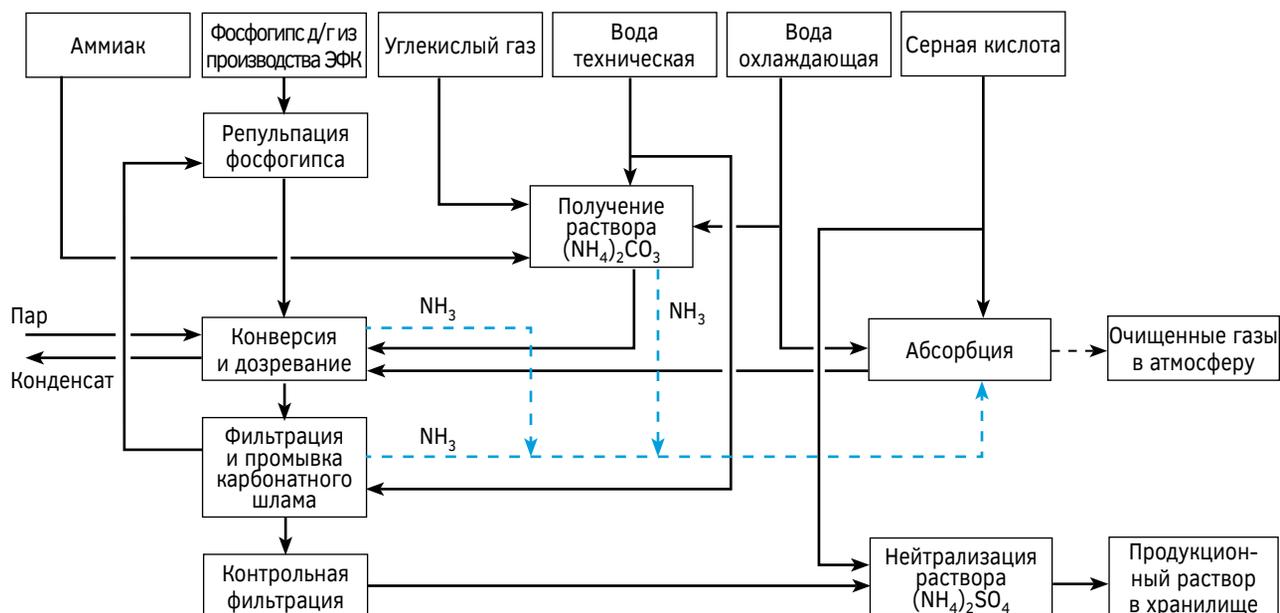


Рис. 19.8. Блок-схема процесса «жидкостной» конверсии фосфогипса

В процессе «газовой» конверсии реакцию образования $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ ведут непосредственно в реакторе конверсии, что позволяет использовать тепло данной реакции для получения $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Таким образом, в водную суспензию фосфогипса одновременно вводят NH_3 и CO_2 .

Фосфогипс репульпируют обратным раствором $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, полученным при фильтрации и промывке карбонатного шлама. Далее суспензию фосфогипса с плотностью $1,3 \text{ г/см}^3$ подают в аппарат конверсии, куда через специальные диспергаторы под слой реакционной массы в необходимом количестве подаются газообразные NH_3 и CO_2 . Процесс конверсии могут проводить под избыточным давлением, что позволяет повысить выход $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Из аппарата конверсии реакционная масса поступает в аппараты кристаллизации и далее декарбонизации раствора $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, для чего в них подается суспензия фосфогипса. Карбонатный шлам фильтруют и промывают на вакуум-фильтре, раствор сульфата аммония осветляют в отстойнике или с использованием контрольной фильтрации. Кристаллический сульфат аммония получают из осветленного раствора аналогичным способом, как в процессе «жидкостной» конверсии. Блок-схема процесса представлена на рис. 19.9.

К недостаткам «газового» метода можно отнести высокие требования к диспергированию подаваемых в реактор газов: чем выше диспергирование, тем лучше фильтрационные свойства получаемой пульпы. Продолжительность пребывания конверсионной пульпы в реакторе при использовании «газового» метода, как правило, больше по сравнению с «жидкостным»: 5–6 часов против 3,5–4 часа соответственно. Известно, что потери NH_3 и CO_2 в «газовом» процессе выше, что приводит к необходимости организации более качественной очистки газов, при этом растет удельный расход серной кислоты.

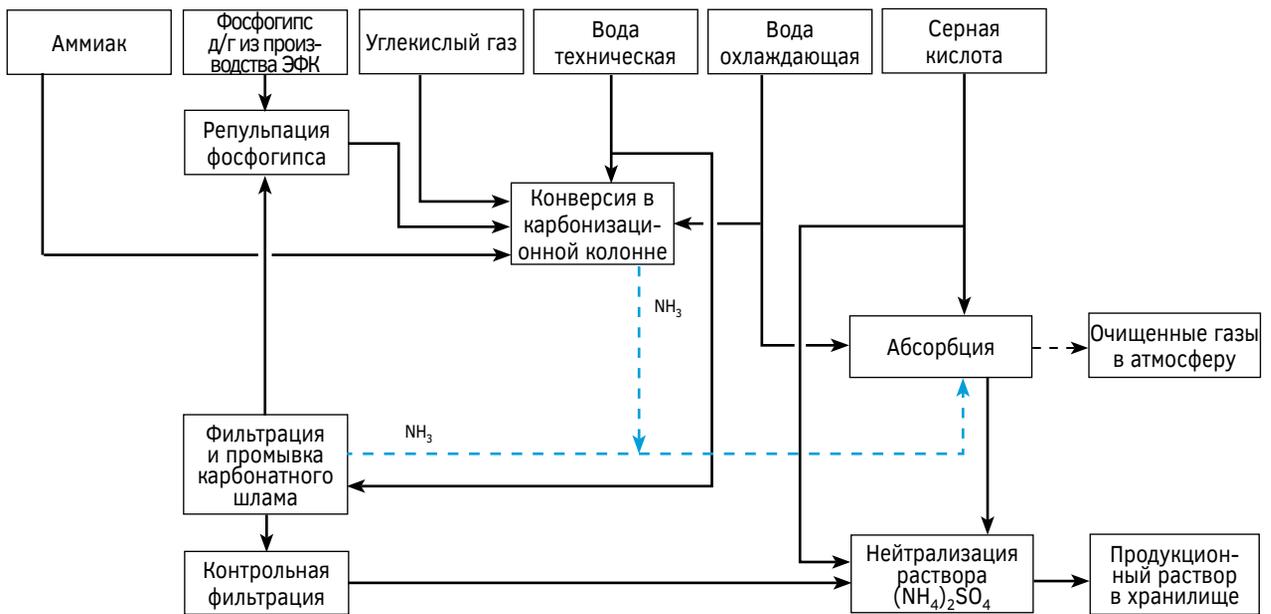


Рис. 19.9. Блок-схема процесса «газовой» конверсии фосфогипса

Разработан и опробован в опытно-промышленных условиях «газожидкостной» метод конверсии фосфогипса, сочетающий в себе преимущества «жидкостного» и «газового» методов конверсии. В реактор конверсии кроме полученного раствора $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ подают газообразные NH_3 и CO_2 в количестве 10–15% от стехиометрической нормы фосфогипса. Выделяющееся тепло реакции газообразных реагентов покрывает потребность в энергии, необходимой для поддержания оптимальной температуры реакции — 50–55°С. Блок-схема процесса приведена на рис. 19.10.

Процесс «газожидкостной» конверсии ведут в каскаде из трех реакторов. В последний реактор каскада вводится газообразный CO_2 . Продолжительность взаимодействия составляет 4 часа. Остальные стадии технологии получения $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ не отличаются от способов, описанных выше.

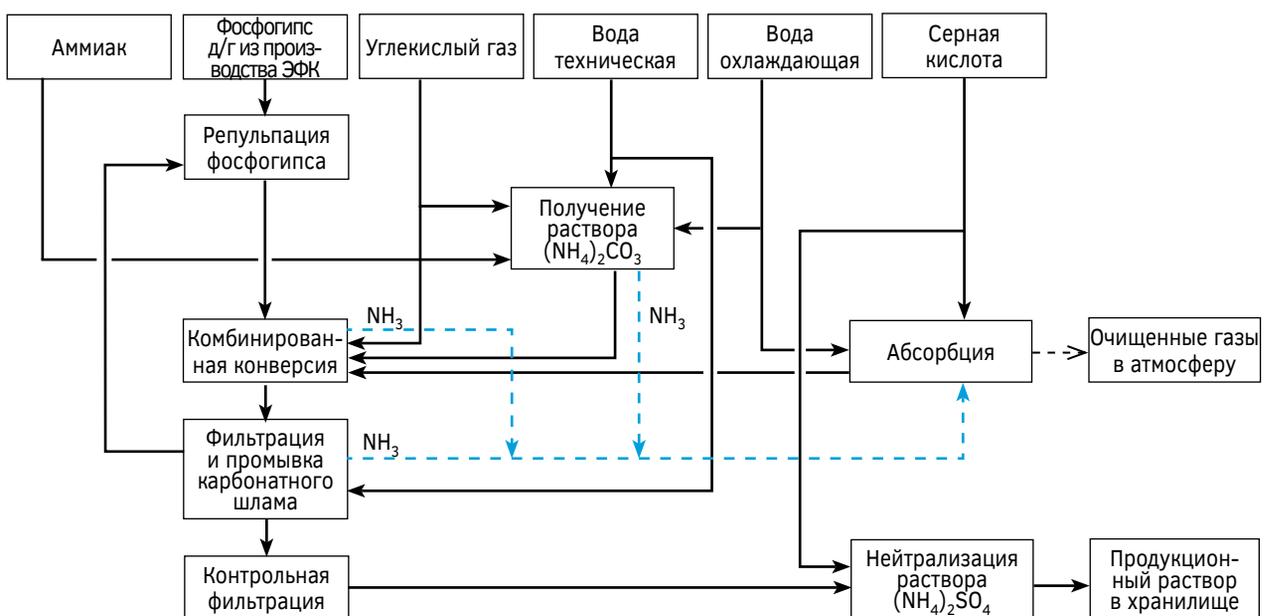
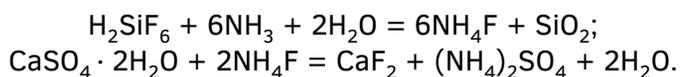


Рис. 19.10. Блок-схема процесса «газожидкостной» конверсии фосфогипса

Совместная конверсия фосфогипса и кремнефтористоводородной кислоты. Совместная конверсия фосфогипса и кремнефтористоводородной кислоты (H_2SiF_6) позволяет переводить сульфатную серу из фосфогипса в раствор $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, при этом ион кальция используется для связывания фтора, содержащегося в H_2SiF_6 . Благодаря низкой растворимости CaF_2 и SiO_2 , степень конверсии компонентов достигает очень высоких значений, при этом примеси фтора и кремния практически полностью переходят в твердую фазу. Растворимые соединения фосфора, содержащиеся в фосфогипсе, остаются в растворе. В результате процесса получают раствор $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ и фтористый шлам, содержащий остаточное количество фосфогипса, фторид кальция и кремнегель.

В основе технологии лежат следующие основные реакции:



Преимуществом данного способа является то, что использование совместной конверсии позволяет одновременно утилизировать два побочных продукта, получаемых при производстве ЭФК: фосфогипса и кремнефтористоводородной кислоты. В результате процесса получают хорошо фильтруемый и относительно сухой промытый шлам, который не содержит фосфатов и который можно применять в производстве цемента в качестве минерализатора. Относительно низкая влажность шлама позволяет транспортировать его без каких-либо затруднений.

Недостаток способа заключается в том, что из-за высокого разбавления кремнефтористоводородной кислоты (содержание H_2SiF_6 составляет 5–12%) раствор $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ получается с относительно низкой концентрацией, а упарка раствора является энергозатратной.

Конверсия ведется в каскаде реакторов. Фосфогипс, поступающий со стадии фильтрации производства ЭФК, направляют в реактор, где его обрабатывают раствором аммиака с концентрацией 8–12% NH_3 . Соотношение жидкой и твердой фаз в реакторе составляет 1,5÷2,5 : 1. В полученную суспензию вводят в стехиометрическом количестве к NH_3 кремнефтористоводородную кислоту концентрацией 5–12%. Избыток кальция (CaSO_4) по отношению к H_2SiF_6 составляет 110–140% от стехиометрической нормы. С целью более полного осаждения ионов фтора в виде CaF_2 , а также комплексных соединений аммонийных фосфат-фторидов железа и алюминия, присутствующих в фосфогипсе, в следующем реакторе величину pH суспензии повышают до 8,0–8,8. При этом золь SiO_2 переходит в хорошо отделяемый гель, что также способствует более эффективному разделению твердой и жидкой фаз суспензии. Полученная реакционная масса разделяется на фильтре, а осадок промывается. Удельный съем по сухому осадку составляет 250–300 кг/м² в час. Блок-схема процесса приведена на рис. 19.11.

Использование фосфогипса при строительстве автомобильных дорог

Возможность применения фосфогипса при строительстве автомобильных дорог широко исследовалась как в России, так и за рубежом. В последнее время это направление использования фосфогипса развивается значительно, нежели прочие.

При строительстве автомобильных дорог как непосредственно фосфогипс, так и фосфополугидрат в различных композициях могут использоваться в качестве заменителей природных материалов для устройства оснований дорожных одежд.

В дорожном строительстве фосфогипс, основным веществом которого является $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, рекомендуется применять при устройстве верхних и нижних слоев оснований автомобильных дорог. В 1989 г. Государственный всесоюзный дорожный научно-исследовательский институт (СоюзДорНИИ) утвердил «Методические рекомендации по применению фосфодигидрата сульфата кальция при строительстве автомобильных дорог», в которых

рекомендуется применять фосфогипс при строительстве слоев оснований автомобильных дорог III–V категорий. Область применения этого продукта:

- гранулометрическая добавка к щебеночным и гравийным материалам при устройстве оснований дорожных одежд в IV–V дорожно-климатических зонах (ДКЗ);
- компонент комплексных минеральных вяжущих для обработки грунтов и каменных материалов в основаниях дорожных одежд во II–V ДКЗ;
- в смеси с карбамидоформальдегидной смолой, для устройства оснований дорожных одежд во II–V ДКЗ;
- в смеси с цементом или карбамидоформальдегидной смолой, в смеси с отсевами дробления гранита или известняка для производства бортовых камней для дорог во II–V ДКЗ.

Требования к применяемому фосфогипсу:

- зерновой состав не нормируется;
- химический состав (текущего производства, частично обезвоженный, а также из отходов) должен удовлетворять следующим требованиям:
 - массовая доля основного вещества ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) в пересчете на сухое вещество — не менее 80%;
 - массовая доля водорастворимых фтористых соединений в пересчете на фтор — не более 0,5%.

При использовании фосфогипса в слоях основания дорожных одежд рекомендуется устраивать поверхностную обработку слоев оснований путем розлива низковязких дегтей, сырых каменноугольных смол или жидких нефтяных битумов и высоковязких нефтей из расчета 1–1,2 л/м². Кроме того, рекомендуется устраивать шероховатую поверхность слоя основания для улучшения сцепления его с покрытием. Для этого по недоуплотненному слою основания распределяют щебень в количестве 13–15 кг/м², а затем проводят уплотнение.

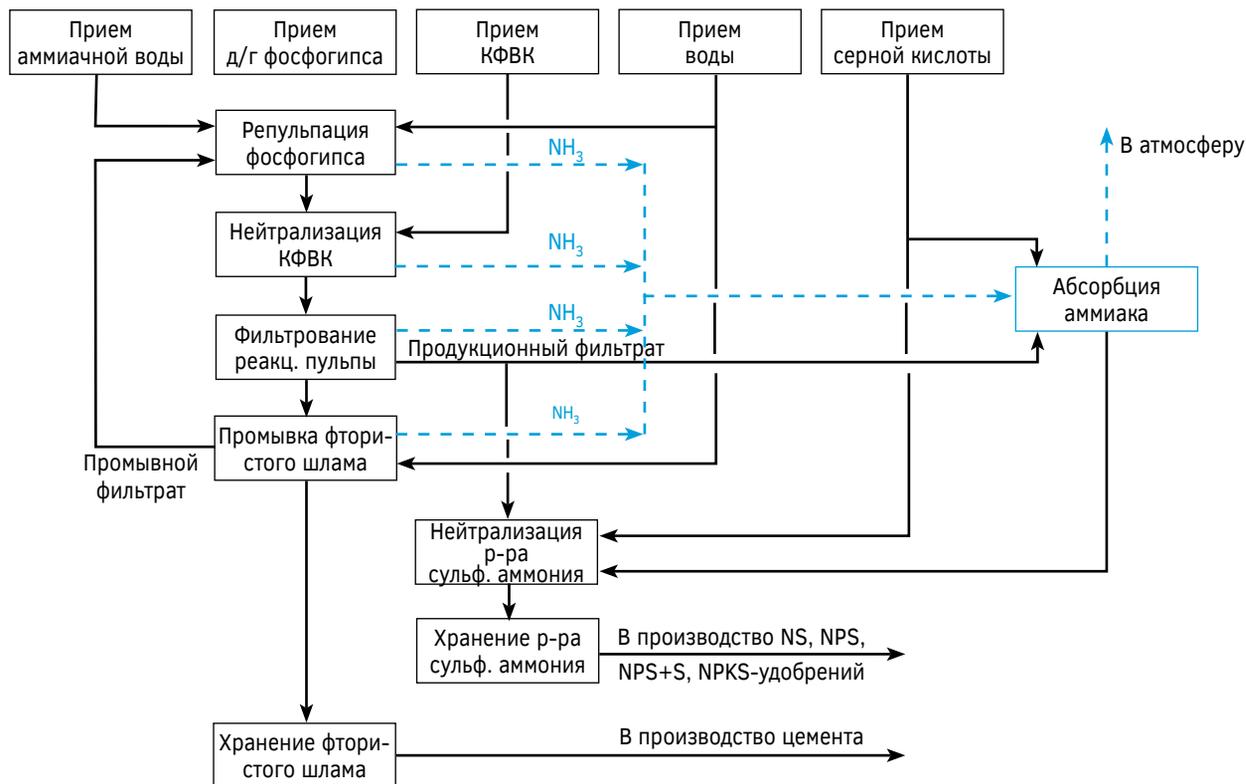


Рис. 19.11. Блок-схема процесса совместной конверсии фосфогипса и кремнефтористоводородной кислоты

При использовании фосфогипса в качестве добавки к щебеночным и гравийным материалам для повышения их плотности содержание фосфогипса обычно составляет 20–30% массы сухой смеси. Оптимальная влажность должна составлять около 6–10%. Расчетный модуль упругости слоя основания из щебеночных и гравийных материалов с добавкой фосфогипса должен быть не менее 300–450 МПа.

Экономический эффект от применения фосфогипса зависит от дальности его транспортирования, при этом расход привозных щебеночных, гравийных и песчано-гравийных смесей сокращается на 30–40%; экономия цемента достигает 300 т, горюче-смазочных материалов — 200 л на 1 км дороги.

Фосфополугидрат, обладающий вяжущими свойствами, используется в строительстве дорожных одежд значительно чаще, нежели фосфогипс; при этом применение фосфополугидрата не требует его предварительной обработки и кондиционирования добавками.

В 1987 г. СоюзДорНИИ утвердил «Методические рекомендации по устройству оснований дорожных одежд с использованием свежего фосфополугидрата сульфата кальция». Согласно данным методическим рекомендациям при строительстве оснований дорожных одежд свежий фосфополугидрат может быть использован в качестве:

- минерального материала, обладающего способностью самоцементироваться;
- самостоятельного или смешанного вяжущего для обработки песка, гравия, щебня, и золошлаковых смесей;
- расклинивающего вяжущего при строительстве щебеночных оснований.

Свежий фосфополугидрат, содержащий 25–35% воды, относится к медленноотвердеющим вяжущим. Длительность твердения зависит от температуры и содержания в нем остатков фосфорной кислоты и, как правило, не превышает 1–3 суток. Применять материал, пролежавший в отвале или находящийся на трассе дороги более 3 суток, не рекомендуется, так как его прочность уменьшается на 40–50%.

В соответствии со стандартом организации СТО 24406528-01–2018, утвержденным в 2018 г., фосфополугидрат с влажностью не более $30 \pm 2\%$ укладывают слоем высотой 300–500 мм после уплотнения катком. Уплотнение фосфополугидрата рекомендуется начинать по истечении трех часов после выхода из цеха ЭФК. Уплотнение фосфополугидрата при влажности 25–30% и температуре воздуха не более 28°С должно быть окончено не позднее 10 часов после его выхода из производства. При температуре 5–10°С уплотнение материала завершают не позднее чем через трое суток после выпуска с предприятия. На слоях из фосфополугидрата для обеспечения нормативного срока службы и безопасности дорожного движения устраивают защитные слои из асфальтобетона или щебня, обработанного вязким битумом.

Расход свежего фосфополугидрата как основного материала основания дорожной одежды составляет около 3000 м³ на 1 км, а в качестве добавки — 300–600 м³ на 1 км. Расчеты технико-экономической эффективности использования фосфополугидрата показывают, что на 1 км дорожной одежды имеет место быть сокращение трудозатрат — до 14 человеко-дней при дальности транспортирования 10 км, экономия щебня — до 2000 м³, цемента — до 280 т, электроэнергии — до 4000 кВт·ч.

Опыт строительства и эксплуатации автомобильных дорог с использованием фосфогипса и особенно фосфополугидрата существует как за рубежом, так и в России (Московская и Саратовская области). Отмечено, что широкому использованию материала препятствуют в основном экономические, культурные и законодательные причины. Первое связано с транспортными издержками. Перевозка на расстояние более 150–200 км делает материал сравнимым по стоимости с традиционно применяемыми материалами (песок, щебень), а в ряде случаев даже дороже последних. Второе относится к консервативности и негативному отношению строителей к использованию фосфогипса как вторичного материального ресурса. Третье порождается отсутствием необходимой нормативной правовой базы по использованию фосфогипса как вторичного материального ресурса при строительстве автомобильных дорог.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФОСФОГИПСА

Использование фосфогипса в народном хозяйстве позволяет снизить техногенное воздействие на окружающую среду посредством сокращения объемов добычи полезных ископаемых (гипса и ангидрита) из недр Земли и уменьшения количества складированного химически осажденного сульфата кальция.

Сравнение урожайности сельскохозяйственных культур на различных почвах с использованием и без использования фосфогипса (рис. 19.12) показывает, что фосфогипс может успешно применяться в качестве аналога природного гипса при условии внесения их в эквивалентных количествах по содержанию $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Средние прибавки урожая зерновых культур при внесении 5–10 т $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ на 1 га степных и лугово-степных солонцовых почв составляют 1,6–4 ц/га, кукурузы на зеленую массу — 90–127 ц/га, многолетних трав (житняк, сено) — 2–10 ц/га.

На рис. 19.13 представлены результаты исследования эффективности применения фосфогипса и сыромолотого природного гипса для химической мелиорации солонцовых комплексов Западной Сибири, Зауралья и Северного Казахстана. В ходе исследования было отмечено, что в отличие от природного гипса фосфогипс не теряет свою первоначальную сыпучесть при увлажнении и последующем высыхании, замерзании и оттаивании. При этом, если природный гипс необходимо хранить в специальных хранилищах, то фосфогипс можно штабелировать в поле без укрытий.

Сравнение расхода тепла на получение гипсовых вяжущих из фосфогипса проводилась для трех технологических схем:

- 1) термическая обработка фосфогипса при атмосферном давлении;
- 2) термическая обработка фосфогипса с естественной влажностью в автоклаве;
- 3) термическая обработка суспензии фосфогипса (Ж : Т = 1 : 1) при перемешивании в автоклаве.

Данные, приведенные на рис. 19.14, получены из расчета затрат тепла при производстве вяжущих из фосфогипса, содержащего 30% свободной влаги.

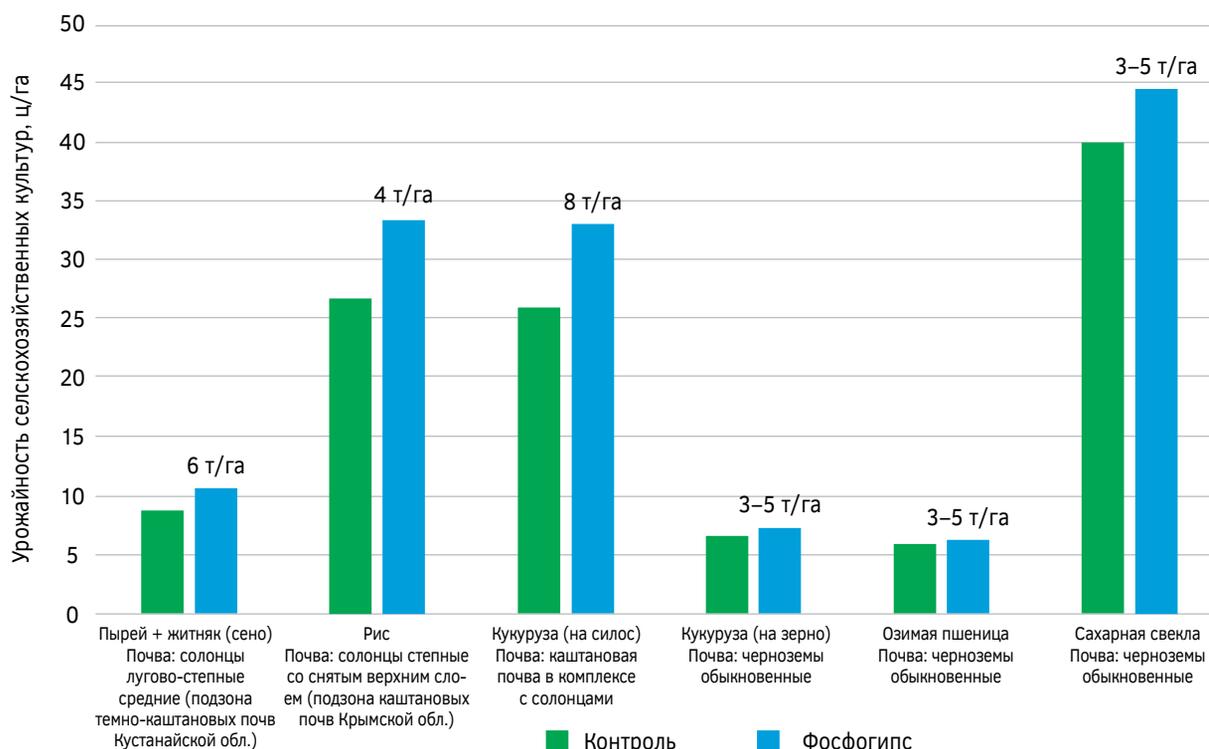


Рис. 19.12. Сравнение урожайности сельскохозяйственных культур на различных почвах с использованием и без использования фосфогипса. Цифры обозначают количество внесенного фосфогипса на 1 га почвы

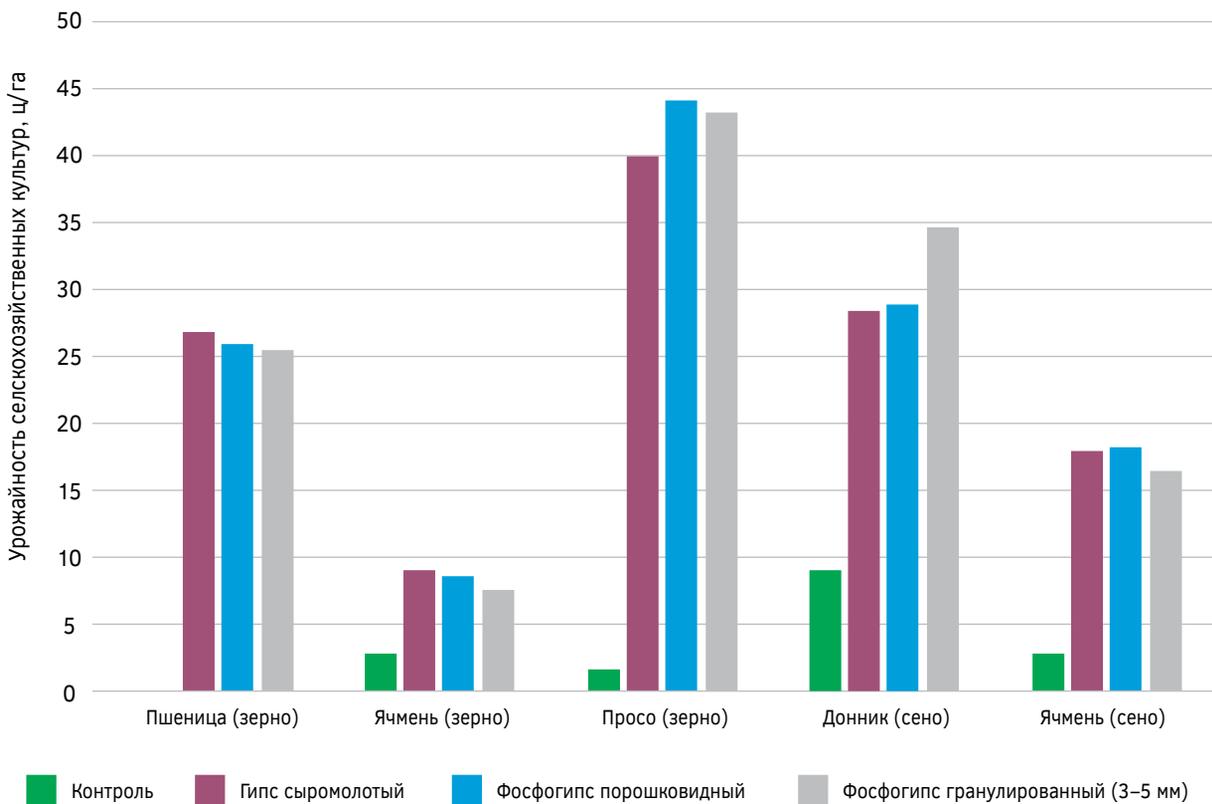


Рис. 19.13. Сравнение урожайности сельскохозяйственных культур на солонцовых комплексах Западной Сибири, Зауралья и Северного Казахстана с использованием природного гипса, фосфогипса и без их использования

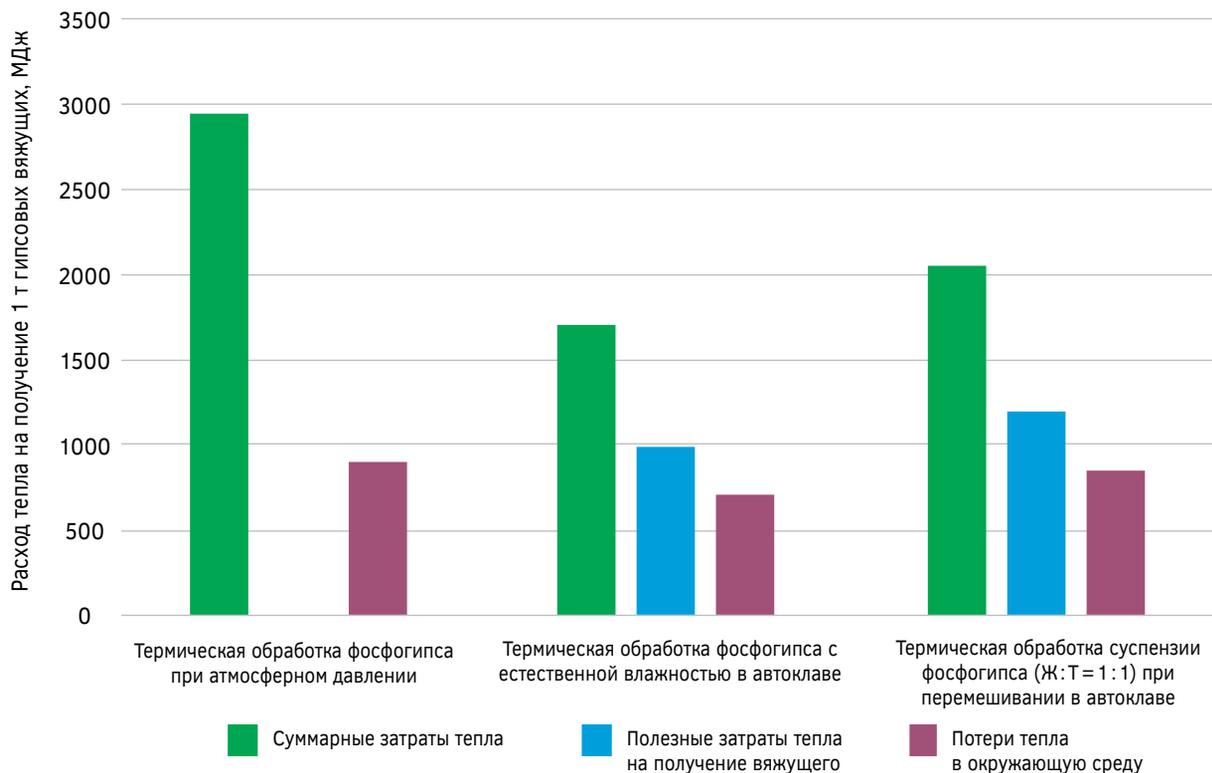


Рис. 19.14. Сравнение расхода тепла на получения 1 т гипсовых вяжущих из фосфогипса по разным технологиям

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФОСФОГИПСА

Мировой опыт на протяжении последних 50 лет показывает, что фосфогипс можно успешно и эффективно использовать и перерабатывать с получением качественной продукции. В 2013 г. общая доля использованного в мире фосфогипса составила не менее 14,1% от общего количества образующегося материала. В России значение данной величины на порядок меньше — около 1%. Последнее объясняется тем, что в существующих условиях складировать фосфогипс с соблюдением всех норм действующего законодательства экономически более выгодно, чем использовать и перерабатывать. Кроме того, важной причиной сложившейся ситуации являются низкие темпы развития строительной индустрии и сельского хозяйства — потенциальными крупнейшими потребителями фосфогипса.

Впрочем, использование и переработка фосфогипса в России и мире имеют большие перспективы. При этом следует отметить, что решение проблемы использования химически осажденного гипса возможно лишь при комплексном подходе, реализуемом в рамках политики ресурсосбережения. Примерами такого подхода являются Китай, Индия и Бразилия, где благодаря особому государственному подходу удалось добиться большого прогресса в деле использования и переработки фосфогипса. В этих странах на государственном уровне было принято во внимание неизбежное крупнотоннажное образование фосфогипса, которое связано с получением фосфорсодержащих минеральных удобрений на основе ЭФК, имеющих огромную важность для обеспечения всемирной продовольственной безопасности. Именно поэтому в названных странах в настоящее время действуют различные меры государственной поддержки, прямо или косвенно влияющие на использование фосфогипса в народном хозяйстве.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ахмедов, М. А. Фосфогипс. Исследование и применение / М. А. Ахмедов, Т. А. Атакузиев. — Ташкент : «Фан» УзССР, 1980. — 172 с.
2. Вольфкович, С. И. Получение сульфата аммония из фосфогипса / С. И. Вольфкович, В. П. Камзолкин, А. А. Соколовский. — М. : Изд-во НТУ ВСНХ, 1929. — 64 с. — (Труды НИУ ; Вып. 64).
3. Гипс и фосфогипс : сборник работ, статей и материалов по вопросам технологического использования гипса и фосфогипса / под ред. проф. С. И. Вольфковича, проф. И. С. Тельшова и инж. А. И. Белопольского. — [Л.] : Госхимтехиздат. Ленингр. отд-ние, 1933. — 140 с. — (Труды Научного ин-та по удобрениям им. Я. В. Самойлова ; Вып. 101).
4. Гипс и фосфогипс : сборник работ по хим. переработке гипса и фосфогипса / под ред. акад. С. И. Вольфковича. — М. : Госхимиздат, 1958. — 304 с. (Труды Научного ин-та по удобрениям и инсектофунгицидам им. проф. Я. В. Самойлова ; Вып. 160).
5. Гордашевский, П. Ф. Производство гипсовых вяжущих материалов из гипсосодержащих отходов / П. Ф. Гордашевский, А. В. Долгорев. — М. : Стройиздат, 1987. — 105 с.
6. Исследование по использованию фосфогипса / [науч. ред. С. Д. Эвенчик]. — М. : Базовый ОНТИ НИУИФа, 1989. — 320 с. — (Тр. НИУИФа ; Вып. 256).
7. Использование фосфогипса в народном хозяйстве / [отв. ред. В. М. Борисов, С. Д. Эвенчик]. — М. : ОНТИ НИУИФа, 1983. — 192 с. — (Тр. НИУИФа ; Вып. 243).
8. Калиниченко, В. П. Эффективное использование фосфогипса в земледелии // Питание растений. Вестник международного института питания растений. — 2017. — № 1. — С. 2–33.
9. Копылев, Б. А. Технология экстракционной фосфорной кислоты. — Л. : Химия, 1972. — 312 с.
10. Методические рекомендации по применению фосфодигидрата сульфата кальция при строительстве автомобильных дорог : утв.: СоюзДорНИИ 11.09.1987. — М. : СоюзДорНИИ, 1989.
11. Методические рекомендации по устройству оснований дорожных одежд с использованием свежего фосфополугидрата сульфата кальция : утв.: СоюзДорНИИ 01.01.1987. — М. : СоюзДорНИИ, 1987. — 28 с.
12. Мещеряков, Ю. Г. Промышленная переработка фосфогипса / Ю. Г. Мещеряков, С. В. Федоров. — СПб. : Изд-во «Стройиздат СПб», 2007. — 104 с.
13. Нормативы расхода гипсосодержащих материалов при химической мелиорации солонцовых почв на 1990–1995 годы. — М. : Почвенный институт им. В. В. Докучаева, 1990. — 36 с.
14. Рекомендации по использованию фосфогипса для мелиорации солонцов. — М. : ГНУ Почвенный ин-т им. В. В. Докучаева РАСХН, 2006. — 48 с.

15. Сложный компост и его влияние на свойства почвы и продуктивность сельскохозяйственных культур / под ред. И. С. Белюченко. — Краснодар : КубГАУ, 2015. — 181 с.
16. Фосфогипс дорожный для строительства дорожных одежд. Технические условия (Изм. № 1). — Изд. офиц. — СТО 24406528-01-2018 / Балаковский филиал АО «Апатит». — Введ. 01.10.2018. — Балаково, 2018. — 23 с.
17. Фосфогипс и его использование / [В. В. Иванецкий, П. В. Классен, А. А. Новиков и др.] ; под ред. С. Д. Эвенчика, А. А. Новикова. — М. : Химия, 1990. — 224 с.
18. Фосфогипс: хранение и направления использования как крупнотоннажного вторичного сырья : материалы Второй Международной конференции, 18 мая 2010 г. / [сост. В. И. Суходолова]. — М. : НИУФ, 2010. — 192 с.
19. *Becker, P.* Phosphates and Phosphoric Acid. Raw Materials, Technology and Economics of the Wet Process. — New York ; Basel, 1983. — 586 p.
20. Phosphogypsum. Proceedings of the International Symposium on Phosphogypsum. Utilization and/or Disposal of Phosphogypsum Potential Barriers to Utilization. Lake Buena Vista, Florida. 5–7 November 1980. — Bartow : Florida Institute of Phosphate Research, 1987. — 607 p.
21. Phosphogypsum: Sustainable Management and Use / Ed. by AE “Johnny” Johnston. — Paris, 2016. — 96 p.
22. Radiation Protection and Management of NORM Residues in the Phosphate Industry. — Vienna : International Atomic Energy Agency, 2013. — 292 p. — (Safety Reports Series No. 78).

Содержание

Часть первая РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

1. Добыча и обогащение угля <i>А. В. Григорьев, И. С. Курошев</i>	13
2. Добыча углеводородного сырья <i>Ю. Н. Линник, В. Ю. Линник</i>	52
3. Добыча железной руды <i>С. Н. Кизиллов, А. А. Лиске</i>	91
4. Добыча алюминиевого сырья <i>М. Л. Рахманов, О. С. Ежова</i>	129
5. Добыча и обогащение драгоценных металлов <i>Б. Б. Ковалев, К. Э. Дубровин</i>	163

Часть вторая РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВ

6. Переработка углеводородного сырья <i>К. И. Дементьев, А. Ю. Попов</i>	207
7. Производство чугуна и стали <i>А. В. Федаш, И. С. Курошев</i>	257
8. Производство драгоценных металлов <i>С. П. Зайцев, К. Э. Дубровин</i>	305
9. Производство алюминия <i>М. Л. Рахманов, О. С. Ежова</i>	346
10. Производство керамических материалов <i>А. И. Захаров, А. Ю. Санжаровский</i>	382
11. Производство стекла <i>Е. Е. Строганова, К. А. Щелчков</i>	419
12. Производство цемента <i>Е. Н. Потапова, М. А. Волосатова</i>	455
13. Производство минеральных удобрений <i>В. М. Лапушкин, К. В. Аксенчик, А. С. Малявин</i>	515
14. Производство целлюлозы, древесной массы, бумаги, картона <i>А. М. Кряжев, Е. А. Фрундина</i>	562

Часть третья
РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПЕРЕРАБОТКИ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ

15. Вторичные ресурсы, образующиеся в сфере теплоэнергетики <i>Л. Я. Шубов, К. Д. Скобелев, Д. А. Загорская</i>	649
16. Вторичные ресурсы, образующиеся в горнодобывающей промышленности <i>И. В. Петров</i>	671
17. Вторичные ресурсы, образующиеся в нефтедобывающей промышленности <i>М. М. Редина, А. П. Хаустов</i>	706
18. Вторичные ресурсы, образующиеся в металлургической промышленности <i>Е. П. Волынкина</i>	742
19. Вторичные ресурсы, образующиеся в химической промышленности <i>Е. Л. Торочков, А. И. Ряшко</i>	801



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
«ЦЕНТР ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПОЛИТИКИ»

<https://eipc.center/>

Справочное издание

ЭНЦИКЛОПЕДИЯ ТЕХНОЛОГИЙ
Эволюция и сравнительный анализ
ресурсной эффективности
промышленных технологий

Главный редактор Д. О. Скобелев

Ответственный редактор О. С. Ежова

Технический редактор *А. Б. Левкина*
Дизайн обложки *Т. Б. Тунова*
Подготовка иллюстраций *А. В. Ткаченко*
Редакторы *Л. А. Брисовская, А. А. Нотик, О. К. Чеботарева*
Корректоры *Ю. В. Дитюкова, А. А. Кузьмина, Г. А. Седова*
Оригинал-макет *С. В. Красильнюк, Л. А. Харитонов*

Подписано в печать 27.11.2019. Формат 60 × 84 1/8.
Усл. печ. л. 96,1. Тираж 500 экз. Печать офсетная.
Заказ № 275Р.

Отпечатано в типографии издательско-полиграфической фирмы «Реноме»,
192007, Санкт-Петербург, наб. Обводного канала, д. 40.
Тел./факс (812) 766-05-66. E-mail: book@renomespb.ru
ВКонтакте: https://vk.com/renome_spb
www.renomespb.ru