

РОССИЙСКИЙ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ЭКОЛАЙН

МОНИТОРИНГ И СОКРАЩЕНИЕ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА РОССИЙСКИХ ВОДОКАНАЛОВ

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА СООРУЖЕНИЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Бегак М. В., Гусева Т. В., Молчанова Я. П., Аверочкин Е. М., Сагайдук В. Л.



Москва
2013



British Embassy
Moscow

При поддержке Фонда благосостояния Министерства иностранных дел Великобритании



Санкт-Петербургский
научно-исследовательский
центр экологической
безопасности РАН



МОНИТОРИНГ И СОКРАЩЕНИЕ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА РОССИЙСКИХ ВОДОКАНАЛОВ

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА СООРУЖЕНИЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Бегак М. В., Гусева Т. В., Молчанова Я. П., Аверочкин Е. М., Сагайдук В. Л.

**Москва
2013**

УДК 628.551.588.74
ББК 28.08.2; 38.761.2
М77

Авторы: М. В. Бегак, Т. В. Гусева, Я. П. Молчанова, Е. М. Аверочкин, В. Л. Сагайдук

М77 Мониторинг и сокращение углеродного следа российских водоканалов.
Методика определения углеродного следа сооружений очистки сточных вод.
М. В. Бегак, Т. В. Гусева, Я. П. Молчанова, Е. М. Аверочкин, В. Л. Сагайдук.
– М.: Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева,
2013. – 56 с.

ISBN 978-5-7237-1085-6

Методика определения углеродного следа канализационных очистных сооружений разработана в ходе выполнения проекта «Мониторинг и сокращение углеродного следа российских предприятий водоснабжения и водоотведения». Методика соответствует новым рекомендациям Межправительственной группы экспертов по изменению климата, содержит существенные уточнения в части определения специфических для предприятий водопроводно-канализационного хозяйства эмиссий метана и закиси азота в процессе очистки сточных вод и утилизации илового осадка.

В 2012-2013 гг. методика апробирована при проведении оценки углеродного следа канализационных очистных сооружений ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга».

Предлагаемый вниманию читателей материал может применяться на практике при расчёте выбросов парниковых газов предприятий водоотведения, а также может быть использован в процессе преподавания специальных дисциплин и выполнения студенческих дипломных работ.

УДК 628.551.588.74
ББК 28.08.2; 38.761.2

ISBN 978-5-7237-1085-6

- © Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева, 2013
- © М. В. Бегак, Т. В. Гусева, Я. П. Молчанова, Е. М. Аверочкин, В. Л. Сагайдук, 2013

Содержание

К читателю.....	5
Список используемых сокращений.....	6
1. Введение	7
2. Углеродный след очистных сооружений.....	9
2.1 Методологии определения выбросов парниковых газов, рекомендованные Рамочной конвенцией ООН по изменению климата	11
2.1.1 Определение выбросов метана	13
2.1.2 Определение выбросов закиси азота при размещении осадка	21
2.1.3 Определение выбросов парниковых газов, связанных с производством электроэнергии.....	22
2.1.4 Определение выбросов парниковых газов, связанных с потреблением топлива .	24
2.1.5 Определение выбросов парниковых газов, связанных с приобретением тепла внешних источников.....	25
2.1.6 Определение выбросов парниковых газов, связанных с перевозкой илового осадка	27
2.2 Выделение закиси азота в процессе очистки сточных вод.....	28
2.3 Уточнения методологий МГЭИК.....	33
3. Пошаговый расчет углеродного следа очистных сооружений.....	37
Шаг 1. Углеродный след, обусловленный импортируемой электроэнергией, потребляемой на производственной площадке и в офисных помещениях	37
Шаг 2. Углеродный след, обусловленный потреблением тепловой энергии.....	38
Шаг 2.1. Тепло генерируется непосредственно на производственной площадке	38
Шаг 2.2. Тепло приобретается у отдельного источника.....	39
Шаг 3. Углеродный след, обусловленный использованием автомобильного транспорта	42
Шаг 4. Углеродный след, обусловленный выбросами метана при очистке сточных вод	43
Шаг 4.1. Первичные отстойники.....	43
Шаг 4.2. Аэробная очистка	45
Шаг 4.3. Упрощенный вариант расчета выбросов метана при очистке сточных вод на биологических очистных сооружениях	46
Шаг 5. Углеродный след, обусловленный выбросами парниковых газов при утилизации осадка сточных вод	46
Шаг 5.1. Сжигание илового осадка	46
Шаг 5.2. Размещение осадка на полигоне или иловой площадке.....	47
Шаг 5.3. Обработка илового осадка в новом метантенке	48
Шаг 5.4. Выбросы закиси азота при захоронении сырого осадка в почве или его размещении на полигоне	48
Шаг 6. Углеродный след, обусловленный выбросами закиси азота в процессе очистки сточных вод.....	49

Шаг 7. Углеродный след, обусловленный выбросами метана при попадании в водный объект недостаточно очищенных сточных вод	49
Шаг 8. Углеродный след, обусловленный использованием реагентов и расходных материалов при очистке сточных вод	51
4. Мониторинг параметров, необходимых для расчета углеродного следа очистных сооружений.....	53
4.1 Энергетика.....	53
4.2 Транспорт	53
4.3 Процесс очистки сточных вод.....	54
4.4 Утилизация илового осадка	54
5. Заключение. Рекомендации	55

К читателю

Методика определения углеродного следа канализационных очистных сооружений подготовлена в рамках работы над проектом «Мониторинг и сокращение углеродного следа российских предприятий водоснабжения и водоотведения». Проект выполнен в 2012-2013 гг. силами АНО «Эколайн» и ФГБУ науки Санкт-Петербургского научно-исследовательского центра экологической безопасности РАН при поддержке Министерства иностранных дел Великобритании в рамках программы Фонда благосостояния.

Партнёры проекта – ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» и Российская ассоциация водоснабжения и водоотведения.

Углеродный след (разновидность экологического следа) – это совокупность выбросов парниковых газов, произведенных прямо и косвенно человеком, организацией, регионом, связанных с осуществлением какой-либо деятельности, предоставлением услуги, производством продукции или даже её жизненным циклом в целом. Оценить углеродный след можно, рассчитав выбросы парниковых газов и прежде всего диоксида углерода, метана, закиси азота и ряда фторсодержащих соединений.

Сооружения очистки сточных вод, по сути своей, являются природоохранными предприятиями. Их основная задача — «вытирать» экологические следы своих абонентов, снижая воздействие последних на окружающую среду. Но эффективность очистки сточных вод в плане энергетических затрат на проведение процесса, технологии очистки, транспортировки илового осадка может быть предметом исследования. Результатом такого исследования явится величина углеродного следа как интегральная мера эффективности очистки сточных вод.

Разработанная методика определения углеродного следа очистных сооружений соответствует новым рекомендациям Межправительственной группы экспертов по изменению климата, содержит существенные уточнения в части определения специфических для предприятий водоотведения эмиссий метана и закиси азота в процессе очистки сточных вод и утилизации илового осадка.

Методика разработана в сотрудничестве с партнёрами проекта и представлена коллегам из профильных высших учебных заведений и научно-исследовательских институтов. В обсуждении материала активное участие приняли следующие специалисты:

- О. Н. Рублевская, заместитель директора по развитию филиала «Инженерно-инновационный центр» ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»;
- Т. В. Передня, директор Департамента природопользования ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»;
- И. В. Алексеева, заместитель директора Департамента природопользования ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»;
- кандидат технических наук Д. А. Данилович, заместитель директора Российской ассоциации водоснабжения и водоотведения;
- доктор технических наук, профессор В. И. Панфилов, заведующий кафедрой промышленной биотехнологии Российского химико-технологического университета имени Д. И. Менделеева;
- доктор технических наук, профессор И. И. Павлинова, заведующая кафедрой коммунального и промышленного водопользования Московской государственной академии коммунального хозяйства и строительства;

- доктор технических наук, профессор В. И. Баженов, профессор кафедры коммунального и промышленного водопользования Московской государственной академии коммунального хозяйства и строительства;
- доктор технических наук, профессор Е. В. Алексеев, заведующий кафедрой «Водоотведение и водная экология» Московского государственного строительного университета;
- доктор биологических наук, профессор А. А. Денисов, заведующий отделом производственной санитарии и охраны окружающей среды ГНУ «Всероссийский научно-исследовательский и технологический институт биологической промышленности» Российской академии сельскохозяйственных наук;
- доктор биологических наук, профессор Н. С. Жмур, заместитель директора ООО «АКВАРОС»;
- доктор физико-математических наук, профессор, Е. В. Веницианов, заведующий лабораторией качества вод Института водных проблем Российской академии наук.

Исполнители проекта благодарны руководителям и сотрудникам Департамента государственной политики и регулирования в сфере нормирования негативного воздействия и мониторинга окружающей среды Министерства природных ресурсов и экологии РФ, Департамента природопользования и охраны окружающей среды и ОАО «Мосводоканал» за поддержку и ценные рекомендации.

Большой вклад в выполнение проекта внесли российские и зарубежные эксперты консультационных компаний ООО «Мотт Макдональд – Р», ООО «Эковод» и LLC «Рёугу».

Исполнители проекта искренне признательны всем, кто поддержал разработку методики, принял участие в семинарах, полевых исследованиях, сборе и анализе информации.

В 2012–2013 гг. методика апробирована при проведении оценки углеродного следа канализационных очистных сооружений ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга».

Предлагаемый вниманию читателей материал может применяться на практике при расчёте выбросов парниковых газов предприятий водоотведения, а также может быть использован в процессе преподавания специальных дисциплин и выполнения студенческих дипломных работ.

Список используемых сокращений

БПК	биологическое потребление кислорода
КОС	коммунальные очистные сооружения
МГЭИК	Межправительственная группа экспертов по изменению климата
ПГ	парниковые газы
ТБО	твёрдые бытовые отходы
ТЭЦ	теплоэлектроцентраль
ХПК	химическое потребление кислорода

1. Введение

Движение человечества на пути устойчивого развития является невозможным без наличия некого компаса, показывающего верное направление. Таким компасом является система индикаторов устойчивого развития.

Впервые необходимость разработки индикаторов устойчивого развития была отмечена в «Повестке дня на 21 век», которая была принята на Конференции ООН по окружающей среде и развитию в Рио-де-Жанейро (1992 г.). С тех пор разработка показателей идет двумя путями:

1. Путем построения систем индикаторов – т.е. групп показателей, характеризующих экологическое, экономическое и социальное развитие.
2. Путем формирования интегральных показателей, комплексно оценивающих ситуацию в определенном районе, отрасли и т.д.

Так называемые «следы» – экологический и углеродный – это примеры интегральных показателей; индикатор «экологический след» был разработан в 1995 году на основе концепции об ассимиляционной емкости биосферы.

Идея использовать индикатор, в основе которого лежит площадь территории, сама по себе не нова. Одним из первых европейских учёных, применявших данный подход, считается французский историк Фернан Бродэль (1902–1985), который использовал площадь территорий в качестве показателя торговли, потребления и производства сельскохозяйственной продукции, поскольку считал, что гектар – намного более точный показатель экономической активности, чем постоянно меняющаяся курс единица валюты.

Многих современных экологов-экономистов гектар привлекает по сходным причинам – он обеспечивает подходящую «валюту» для оценки воздействия на окружающую среду и является хорошей мерой определения устойчивости.

Современный подход к оценке уровня потребления населения, выраженной в единицах площади, т.е. концепция экологического следа, был предложен в 1996 г. У. Рисом (W. Rees) и М. Вакернагелем (M. Wackernagel)¹.

Согласно данной концепции экологический след представляет собой общую площадь продуктивных территорий суши и водных ресурсов, необходимую для производства зерновых культур, морепродуктов, мяса, древесины, обеспечения энергией, предоставления пространства для размещения инфраструктуры и т.п. Индикатор позволяет рассчитать, сколько ресурсов способна дать Земля без ущерба для себя (в пределах биологической емкости) и сколько ресурсов в действительности потребляют люди (собственно экологический след). Биологическая емкость и экологический след измеряются в глобальных гектарах (гга)².

Экологический след включает в себя 6 компонентов: растениеводческий, животноводческий, лесной, рыбный, энергетический (углеродный) и строительный следы.

Углеродный след – это совокупность выбросов парниковых газов, произведенных прямо и косвенно человеком, организацией, регионом, связанных с осуществлением какой-либо деятельности, предоставлением услуги, производством продукции или даже ее жизненным циклом в целом. Оценить углеродный след можно, рассчитав выбросы парниковых газов и прежде всего диоксида углерода, метана, закиси азота и ряда фторсодержащих соединений.

¹ Wackernagel, Mathis, and William Rees. 1996. *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. Gabriola Island, British Columbia: New Society Publishers.

² Глобальный гектар (гга): один гектар биопродуктивной территории или морской акватории со среднемировой продуктивностью.

Каким образом определяется экологический след применительно к предприятиям водоснабжения и водоотведения и, конкретно, к сооружениям очистки сточных вод (канализационным очистным сооружениям)?

В том случае, когда мы рассматриваем эксплуатацию очистных сооружений, нетрудно понять, что экологический след сводится к углеродному. Действительно, сооружения очистки сточных вод, по сути своей, являются природоохранными предприятиями. Их основная задача – «вытирать» экологические следы своих абонентов, снижая воздействие последних на окружающую среду. Но эффективность очистки сточных вод в плане энергетических затрат на проведение процесса, технологии очистки, транспортировки илового осадка может быть предметом исследования. Результатом такого исследования явится величина углеродного следа в качестве интегральной меры эффективности очистки сточных вод конкретных коммунальных очистных сооружений.

В целом процесс определения углеродного следа включает в себя следующие этапы:

1. Определение временных и пространственных границ оценки (период оценки, этапы производства).
2. Анализ имеющихся данных и составление всей цепочки этапов жизненного цикла. Необходимо оценить достаточно ли данных для оценки каждого этапа жизненного цикла или возможна оценка только на входе и выходе.
3. Определение существующих правил оценки, характерных для данного производственного процесса, отрасли и т.д.
4. Поиск информации о каждом отдельном технологическом процессе (информация о потребляемых ресурсах, в том числе энергетических, собственном производстве энергии, отходов и т.д.).
5. Верификация.

2. Углеродный след очистных сооружений

Определение углеродного следа любого предприятия, как было впервые предложено в работе Института мировых ресурсов³, может производиться в нескольких приближениях, различающихся масштабами охвата процессов.

Приближение 1.

Подсчет выбросов парниковых газов ограничивается только производственной площадкой предприятия. Это могут быть непосредственные выбросы из труб (организованных источников выбросов) вследствие сжигания ископаемого топлива и выбросы неорганизованные (фугитивные), также являющееся следствием происходящих на площадке процессов (например, утечка хладонов из холодильников или кондиционеров).

Приближение 2.

В этом случае учитывается вся электрическая и тепловая энергия, потребленная на промышленной площадке. Поскольку, как правило, электричество поставляется из сетей централизованно, в данном приближении выбросы парниковых газов определяются путем умножения величины потребленной энергии на некоторый национальный коэффициент, определяющий выбросы парниковых газов в CO₂-эквиваленте на единицу (киловатт-час) потребленной электроэнергии.

Приближение 3.

Учитываются выбросы парниковых газов вне производственной площадки, не связанные с генерацией энергии, потребляемой рассматриваемым предприятием. Например, это выбросы ПГ от используемого предприятием транспорта, включая общественный и личный транспорт, занятый перевозками работников. Могут также быть учтены выбросы, обусловленные производством материалов, применяемых анализируемым предприятием. Так, для строительной компании, например, могут быть учтены выбросы, сопровождающие выпуск цемента и кирпича, используемого при возведении зданий и сооружений. Однако в ряде методик считается, что такой учет избыточен для инвентаризации парниковых газов, поскольку он может приводить к двойному учету одних и тех же выбросов в общем балансе по стране.

Для коммунальных очистных сооружений приближение 1 включает:

- ✓ выбросы парниковых газов в процессе очистки сточных вод;
- ✓ выбросы от использования покупаемого топлива для поддержания процесса очистки;
- ✓ выбросы от транспортных операций в пределах производственной площадки.

К неорганизованным (фугитивным) выбросам парниковых газов относятся:

- ✓ выбросы метана (CH₄) вследствие анаэробных процессов в первичных отстойниках;
- ✓ выбросы закиси азота (N₂O) вследствие процессов нитрификации и денитрификации;
- ✓ выбросы метана в процессах сбраживания и компостирования осадка, передачи газа по трубам, компостирования, размещения на иловых площадках и полигонах.

В приближении 2 учитываются выбросы парниковых газов при производстве покупаемой предприятием электроэнергии (она расходуется на перекачивание сточных вод, аэрацию, освещение производственных помещений и площадки, ультрафиолетовое обеззараживание), а также сопряженные с производством энергии, расходуемой в форме тепла, пара, холода и т.д.

³ World Resources Institute (2001) The greenhouse gas protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard. World Business Council for Sustainable Development. The Hague p. 27.

В приближении 3 учитываются все выбросы парниковых газов, не учтенные в приближениях 1 и 2, но связанные с производственным процессом. Это, в первую очередь, транспортировка персонала (личный и общественный транспорт), а также доставка необходимых для очистки сточных вод расходных материалов (химические реагенты, запчасти). В ряде моделей учитываются также выбросы парниковых газов при производстве реагентов. В данном случае важно правильно выбрать «место учета», чтобы не было двойного счета. Так, если соли металлов (железа или алюминия) используются для удаления фосфора из сточных вод, то выбросы парниковых газов при их производстве должны быть учтены в углеродном следе КОС. Аналогичная ситуация возникает и с другими реагентами (метанолом, флокулянтами).

Источниками выбросов парниковых газов на КОС являются:

- ✓ метана – анаэробные процессы в первичных отстойниках, уплотнение и обезвоживание осадка на иловых площадках, утечки при сбраживании осадка в метантенках, размещение осадка на полигонах;
- ✓ закиси азота – процессы нитрификации и денитрификации.

Отметим, что в соответствии с принятыми подходами учета парниковых газов не учитывается выброс углекислого газа, образующегося в процессах очистки сточных вод и сжигания илового осадка. Считается, что тот углерод, который выбрасывается в атмосферу при разложении органических веществ, присутствующих в сточных водах, был когда-то, при создании биомассы из атмосферы изъят. Следует подчеркнуть, что подобное допущение принимается и при отказе от учета выбросов углекислого газа, образующихся при сжигании биотоплива, получаемого из таких возобновляемых источников, как древесина, тростник или водоросли.

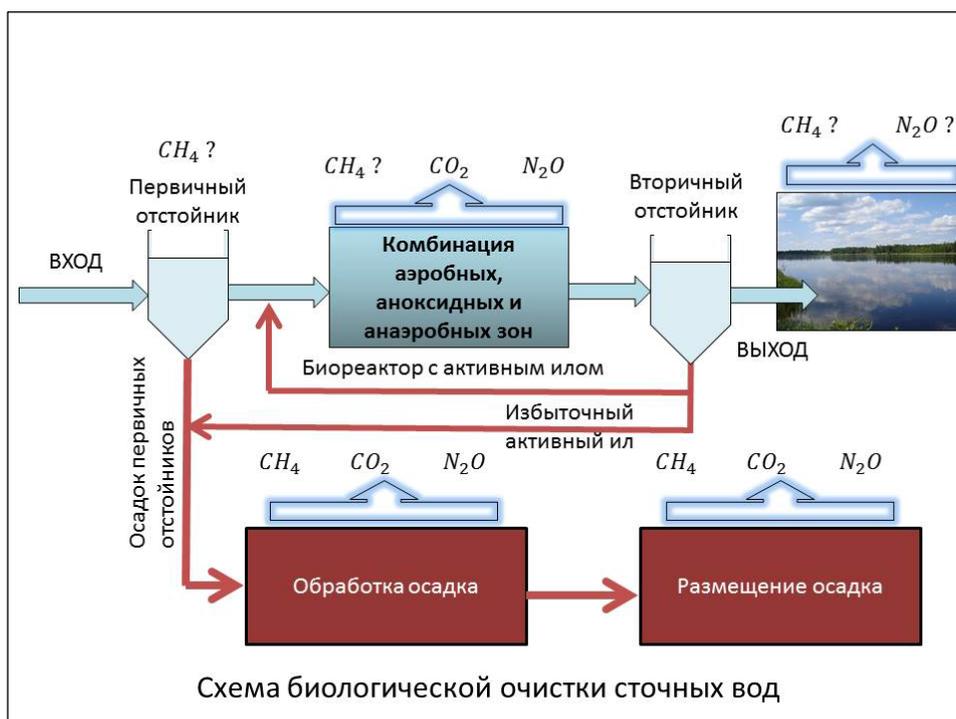


Рис. 1 – Выделение парниковых газов при биологической очистке сточных вод

Для определения выбросов парниковых газов КОС существует несколько моделей. Наиболее адекватными из них являются модели, использующие рекомендации Рамочной конвенции ООН по изменению климата и предлагаемые методологии определения выбросов ПГ для реализации механизмов устойчивого развития. Все методологии определения выбросов парниковых газов разрабатываются членами МГЭИК, проходят обсуждения на сайте Рамочной конвен-

ции ООН по изменению климата⁴. В частности, там рассматриваются выбросы ПГ, сопровождающие процессы очистки сточных вод. Представленные методологии регулярно обновляются и корректируются. В настоящее время используются следующие документы: «AMS-III.H. Methane recovery in wastewater treatment — Version 16.0»⁵ и «Approved baseline and monitoring methodology AM0080. «Mitigation of greenhouse gases emissions with treatment of wastewater in aerobic wastewater treatment plants» — Version 1.0»⁶.

На рисунке 1 показана в общем виде наиболее распространенная схема биологической очистки сточных вод, применяемая на российских предприятиях водоотведения. Биореактор с активным илом является либо простым аэротенком, либо, в зависимости от поставленной задачи биологического удаления соединений азота и фосфора, комбинацией анаэробных, аноксидных и аэробных зон.

Первичный отстойник может являться источником выбросов метана в том случае, если осадок долгое время не выгружается и подвергается анаэробному разложению. Биореактор, как правило, источником метана не является, поскольку ил циркулирует между различными зонами и время его пребывания в анаэробной зоне незначительно. Образование метана в биореакторе с активным илом служит признаком перегрузки очистных сооружений и образования застойных зон, где происходит загнивание активного ила. Закись азота в реакторе образуется в процессах нитрификации и денитрификации. Основными источниками образования метана являются процессы обработки и размещения осадка.

2.1 Методологии определения выбросов парниковых газов, рекомендованные Рамочной конвенцией ООН по изменению климата

Методологии МГЭИК применимы к станциям биологической очистки, предназначенным для очистки хозяйственно-бытовых, промышленных сточных вод или их смесей. Рассматриваются следующие сценарии очистки сточных вод и обработки илового осадка:

1. Биологическая очистка сточных вод включает процессы нитрификации и денитрификации, сопровождающиеся выделением закиси азота.
2. Очистные сооружения работают ненадлежащим образом (несвоевременная выгрузка осадка из первичных отстойников, перегрузка биореактора), что вызывает образование метана.
3. Осадок обезвоживается на иловых площадках с последующим размещением на полигоне, или используется для удобрения и улучшения состава почвы.
4. Осадок перерабатывается в анаэробном реакторе (метантенке) со сжиганием биогаза или использованием биогаза для производства электричества и тепла. Осадок из анаэробного реактора обезвоживается, хранится на полигоне или вносится в почву.
5. Осадок сжигается с получением тепловой или электрической энергии.

В таблице 1 приведены основные источники учитываемых выбросов парниковых газов.

⁴ <http://unfccc.int/2860.php>

⁵ AMS-III.H. Methane recovery in wastewater treatment — Version 16.0
<http://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/4ND00PCGC7WXR3L0LOJTS6SVZP4NSU>

⁶ Approved baseline and monitoring methodology AM0080. «Mitigation of greenhouse gases emissions with treatment of wastewater in aerobic wastewater treatment plants» — Version 1.0
<http://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/6DITU9V0SFOR7EUYEBBVRHCAO2RD3Q>

Таблица 1 – Источники выбросов парниковых газов, включаемые при определении общего выброса ПГ от КОС

Источник	Газ	Включается	Обоснование / Объяснение
Очистка сточной воды и переработка осадка	CH ₄	Да	Главный источник выбросов.
	N ₂ O	Да	Главным образом в процессах нитрификации и денитрификации. В том случае, если иловый осадок вносится в почву для удобрения и улучшения ее структуры, он также может быть важным источником выброса закиси азота.
	CO ₂	Нет	Выбросы CO ₂ от разложения органического вещества не учитываются.
Генерация электрической и тепловой энергии	CO ₂	Да	Выбросы, связанные с производством электрической и тепловой энергии происходят от: а) покупаемой электрической и тепловой энергии, используемой для очистки сточной воды и обработки осадка; б) электрической и тепловой энергии, производимой из ископаемого топлива на площадке. В том случае, если часть электрической и тепловой энергии производится при сжигании осадка или использовании биогаза, эта часть при определении выбросов ПГ не учитывается.
	CH ₄	Нет	Для простоты исключено. Влияние незначительно.
	N ₂ O	Нет	Для простоты исключено. Влияние незначительно.
Транспортировка илового осадка	CO ₂	Да	Выбросы от транспортировки осадка включаются.
	CH ₄	Нет	Для простоты исключено. Этот источник выбросов предполагается очень малым.
	N ₂ O	Нет	Для простоты исключено. Этот источник выбросов предполагается очень малым.
Использование транспорта для других целей	CO ₂	Да	Выбросы от транспортных услуг могут включаться.
	CH ₄	Нет	Для простоты исключено. Этот источник выбросов предполагается очень малым.
	N ₂ O	Нет	Для простоты исключено. Этот источник выбросов предполагается очень малым.
Использование реагентов	CO ₂	Да	Может учитываться.
	CH ₄	Нет	Для простоты исключено. Хотя, в ряде случаев, следует анализировать процесс производства реагента.
	N ₂ O	Нет	Для простоты исключено. Хотя, в ряде случаев, следует анализировать процесс производства реагента.
Сброс сточных вод в водный объект после очистки	CO ₂	Нет	Выбросы CO ₂ от разложения органического вещества не учитываются.
	CH ₄	Да	Может учитываться, если степень очистки от органических веществ не соответствует нормативной.
	N ₂ O	Нет	Для простоты исключено. Этот источник выбросов предполагается очень малым.

Методики МГЭИК предлагают расчетные схемы для выбросов метана как для анаэробных реакторов, так и для принципиально аэробных зон, но работающих в нерасчетных режимах или под повышенной нагрузкой. В этом случае также может образовываться метан, хотя и в незначительном количестве. Кроме того, при сбросе очищенных сточных вод с остаточным содержанием органических веществ в принимающий водный объект, в случае, если водоем является достаточно глубоким и плохо перемешиваемым, также может происходить образование метана в придонном слое.

Отдельно рассматриваются вопросы образования парниковых газов, связанные с импортируемой электроэнергией, теплом, выбросы от транспортных средств, использующихся, например, при перевозке осадка. Также могут быть рассмотрены (приближение 3) выбросы от личного и общественного транспорта, перевозящего работников предприятия и углеродные следы химических реагентов, использующихся при очистке сточных вод.

2.1.1 Определение выбросов метана

Метан, с позиции вклада в парниковый эффект, является довольно эффективным газом. Его потенциал глобального потепления – степень воздействия на глобальное потепление по отношению к углекислому газу – равен 25. Это современное значение, уточненное в исследованиях МГЭИК⁷, учитывает воздействие парникового эффекта в течение 100 лет.

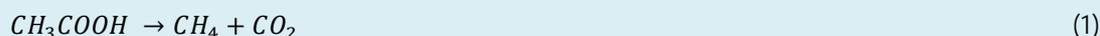
Доля метана в общих выбросах парниковых газов при очистке сточных вод и обработке осадка может составлять до 75 % в CO₂-экв.⁸ Поскольку метан генерируется при анаэробном разложении органических вещества, его выбросы, как правило, связываются с параметрами органического загрязнения сточных вод: БПК или ХПК. Если говорить об основных источниках метана, в первую очередь, следует упомянуть анаэробные реакторы различных конструкций. В российской практике на предприятиях водоотведения анаэробные реакторы не используются. В ограниченных объемах используются лишь метантенки. На врезке 1 иллюстрируются химические и микробиологические процессы, протекающие в анаэробном реакторе.

Врезка 1.

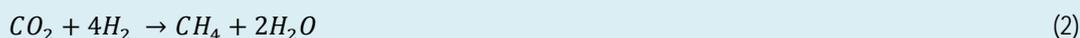
Анаэробные реакторы используются для предварительной очистки промышленных сточных вод с большим содержанием органических вещества и муниципальных сточных вод. После анаэробных реакторов БПК может быть снижено на 60 %, в том случае, если температура сточных вод составляет 20–25 °С, а время гидравлического удерживания сточных вод в реакторе не менее 1–2 суток.

Анаэробные микроорганизмы в отсутствие растворенного кислорода переводят органическое вещество в углекислый газ и метан. Процесс разложения включает две связанных между собой фазы: образование кислот и метана. В течение «кислотной» фазы бактерии преобразуют сложные органические вещества (углеводы, жиры, протеины) в более простые. Этими веществами являются летучие органические кислоты: уксусная, пропионовая, молочная. Следующей фазой является образование метана. Первоначально бактерии переводят органические кислоты в ацетат, водород и углекислый газ. Далее, образование метана с участием метаногенных микроорганизмов идет двумя путями:

1. Разложение уксусной кислоты с образованием метана и углекислого газа



2. Восстановление углекислого газа водородом с образованием метана



Образование метана в анаэробных реакторах может происходить в достаточно узком диапазоне внешних условий, основными из которых являются температура и кислотность среды (рН).

Такие же микробиологические процессы, как описано выше, протекают в метантенках для сбраживания ила. Различие состоит в том, что в метантенках концентрация взвешенных веществ во много раз выше, чем в анаэробных реакторах.

Возможно возникновение анаэробных процессов и загнивание осадка в первичных отстойниках. Это происходит в тех случаях, когда первичный сырой осадок не выгружается вовремя.

Новые методики МГЭИК предлагают рассчитывать выбросы метана при очистке сточных вод в анаэробных условиях с использованием т.н. «метода множителя конверсии метана» по соотношению:

$$E_{CH_4,wwt,an,y} = (Q_{an,y} * \Delta COD_{an,y} * MCF_{ww}) * B_{ww} * GWP_{CH_4} \quad (3)$$

⁷ Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter2.pdf>

⁸ Foley, J., Lant, P., 2007. Fugitive Greenhouse Gas Emissions from Wastewater Systems. WSAA Literature Review No.01. Water Services Association of Australia, Melbourne and Sydney, Australia.

где

$E_{CH_4,wwt,an,y}$ — годовые выбросы метана при анаэробной очистке сточных вод в тоннах CO_2 -экв.;

$Q_{an,y}$ — объем сточных вод, (m^3) проходящих через анаэробную часть очистных сооружений за определенный промежуток времени (год);

$\Delta COD_{an,y}$ — изменение ХПК в сточной воде в анаэробных процессах за год (t/m^3);

MCF_{ww} — среднегодовой коэффициент конверсии для метана, показывающий часть органического вещества, которая будет преобразована в метан. Зависит, в том числе, от конструкции очистных сооружений. Для малых очистных сооружений может быть использована таблица 2;

B_{ww} — удельный выход метана при распаде ХПК в сточной воде. То есть величина, показывающая, какое максимальное количество метана будет образовано при заданном уменьшении ХПК ($kg\ CH_4/kg\ ХПК$);

GWP_{CH_4} — потенциал глобального потепления для метана.

Отметим, что для конкретных расчетов принципиально важным является определение значения $\Delta COD_{an,y}$. Для определения этой величины кроме величины ХПК сточной воды на входе в очистные сооружения необходимо знать величину ХПК после первичных отстойников. Чем большая доля ХПК расходуется в анаэробных условиях первичного отстойника, тем больше будут выбросы метана. Как будет показано ниже, при правильно организованном процессе на стадии аэробной очистки в аэротенках, выбросы метана будут незначительными.

Определение величины MCF_{ww}

Количество метана, образовавшегося в открытом отстойнике, зависит от его глубины и температуры сточных вод в отстойнике. Поэтому среднегодовой множитель конверсии для метана определяется как произведение двух параметров: f_d , определяющего зависимость интенсивности образования метана от глубины, и $f_{T,y}$, определяющего температурную зависимость интенсивности образования метана. Таким образом,

$$MCF_{ww} = f_d * f_{T,y} \quad (4)$$

Для коэффициента f_d методология МГЭИК рекомендует следующие значения: при глубине отстойника более 5 м величина f_d принимается равной 0,7, при глубине от 1 до 5 м — $f_d = 0,5$, при глубине менее 1 м — $f_d = 0$.⁹

Поскольку во многих регионах температура сточной воды может значительно изменяться в течение года, множитель $f_{T,y}$ должен вычисляться как интеграл от ежемесячных значений температурного коэффициента $f_{T,m}$ и с учетом того, как много кислорода было потрачено в этом месяце на разложение органических веществ. Таким образом,

$$f_{T,y} = \frac{\sum_{m=1}^{12} f_{T,m} * \Delta COD_{an,m}}{12 * \sum_{m=1}^{12} \Delta COD_{an,m}} \quad (5)$$

где

$f_{T,y}$ — среднегодовой коэффициент, определяющий интенсивность образования метана от температуры;

⁹ Ряд российских экспертов считают, что зависимость интенсивности образования метана от глубины является весьма сомнительной. На практике глубина отстойников предприятий водоотведения составляет не менее 2,5 м.

$f_{T,m}$ — среднемесячный коэффициент;

$\Delta COD_{an,m}$ — изменение ХПК в сточной воде в анаэробных процессах за месяц (т/мес.).

Величина среднемесячного коэффициента, определяющего интенсивность образования метана в зависимости от температуры, определяется с помощью уравнения Аррениуса, которое устанавливает зависимость константы скорости химической реакции от температуры:

$f_{T,m} = 0$, если $T_m < 283K$

$$f_{T,m} = \exp\left(\frac{Ea*(T_m - T_1)}{R*T_m*T_1}\right), \text{ если } 283K < T_m < 303K \quad (6)$$

$f_{T,m} = 1$, если $T_m > 303K$

где

$f_{T,m}$ — среднемесячный коэффициент, определяющий интенсивность образования метана от температуры сточной воды в анаэробной зоне;

Ea — константа энергии активации (63,533 Дж/моль);

T_1 — 303,16 К (273,16 К +30 К);

R — газовая постоянная (8,314 Дж/К*моль);

T_m — средняя температура сточной воды в анаэробной зоне (К).

Напомним, что температура в кельвинах (T) и температура в градусах Цельсия ($t^{\circ}C$) связаны соотношением $T = t^{\circ}C + 273,15$.

Как видно из уравнения (6), величина температурного коэффициента не может превышать 1, а при температуре ниже 10 °С – принимается равной нулю.

Для упрощенных расчетов можно принимать значения MCF_{ww} из таблицы 2.

Таблица 2 – Значения коэффициентов конверсии метана в зависимости от конструкции очистных сооружений¹⁰

Тип очистных сооружений	Хозяйственно-бытовые сточные воды		Промышленные сточные воды	
	MCF_{ww}	Диапазон изменения	MCF_{ww}	Диапазон изменения
Сброс сточных вод без очистки в водный объект	0,1	0–0,2	0,1	0–0,2
Хорошо организованная аэробная очистка	0	0–0,1	0	0–0,1
Плохо организованная или перегруженная аэробная очистка	0,3 ¹¹	0,2–0,4	0,3	0,2–0,4
Анаэробное сбраживание осадка без утилизации метана	0,8	0,8–1,0	0,8	0,8–1,0
Анаэробный реактор без утилизации метана	0,8	0,8–1,0	0,8	0,8–1,0
Мелкий анаэробный отстойник (глубина менее 2 метров)	0,2	0–0,3	0,2	0–0,3
Глубокий анаэробный отстойник (глубина более 2 метров)	0,8	0,8–1,0	0,8	0,8–1,0

¹⁰ IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (2006). Volume 5, chapter 6 "Wastewater Treatment and Discharge" <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>.

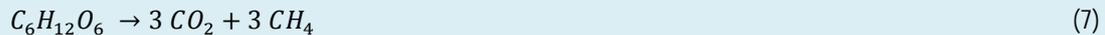
¹¹ Ряд российских экспертов считают это значение завышенным и полагают, что величина коэффициента конверсии здесь не превышает 0,15.

Определение величины B_{ww}

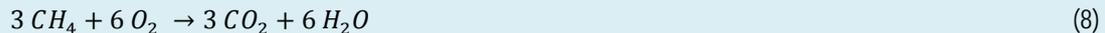
Важным параметром является величина B_{ww} – удельный выход метана при распаде ХПК в сточной воде. Эксперты МГЭИК рекомендуют значение этого параметра равным 0,25 кг CH_4 /кг ХПК¹². В работах^{13,14} приведено теоретическое обоснование величины удельной мощности образования метана (врезка 2).

Врезка 2.

Рассмотрена реакция превращения глюкозы в углекислый газ и метан:



Для полного окисления образовавшегося метана требуется 6 молекул кислорода:



Таким образом, учитывая молярные массы одной молекулы глюкозы ($6 \cdot 12 + 12 + 6 \cdot 16 = 180$ г/моль) и требуемых для ее биохимического окисления шести молекул кислорода (192 г/моль) получаем, что химическая потребность в кислороде (в данном случае по величине совпадающая с биохимической потребностью в кислороде) для одного грамма глюкозы составляет:

$$\frac{r_{O_2}}{r_{C_6H_{12}O_6}} = \frac{192}{180}$$

Доля метана в этом процессе составляет:

$$\frac{r_{CH_4}}{r_{C_6H_{12}O_6}} = \frac{48}{180}$$

Поэтому доля метана на 1 г ХПК составляет:

$$\frac{z_{CH_4}}{z_{O_2}} = \frac{48/180}{192/180} = 0,25 \quad (9)$$

Такое же соотношение получается из уравнения (2), исходя из стехиометрии окислительно-восстановительной реакции.

Выделение метана при обработке осадка

Осадок очистных сооружений содержит значительную долю органических веществ, поэтому при их разложении в анаэробных условиях метан будет также выделяться. Количество выделяемого метана зависит от способа обработки осадка. Если осадок размещается на иловой площадке или полигоне, то для определения выбросов метана из осадка за год ($E_{CH_4,wwt,sl,y}$) в методике МГЭИК используется следующее уравнение:

$$E_{CH_4,wwt,sl,y} = M_{sl,dry,y} * MCF_{sl} * DOC_{sl,dry} * DOC_F * F * \frac{16}{12} * GWP_{CH_4} \quad (10)$$

где

$E_{CH_4,wwt,sl,y}$ — выбросы метана при разложении осадка (т CO_2 -экв./год);

¹² В том случае, если измерение ХПК не проводится, методология МГЭИК предлагает использовать соотношение 0,6 кг CH_4 /кг БПК, не делая различий между БПК₅ (за 5 суток) и БПК₂₀ (за 20 суток). Это предполагает отношение ХПК/БПК = 1,5. По нашему мнению, следует использовать экспериментально измеренные значения отношений ХПК/БПК. По данным ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» отношение ХПК/БПК₅ в общеславных сточных водах, поступающих на КОС, изменяется в диапазоне от 1,5 до 3. Средним значением для хозяйственно-бытовых сточных вод можно считать ХПК/БПК₅ = 2,1.

¹³ Crites, R., and Tchobanoglous, G., 1998. Small and Decentralized Wastewater Management Systems. WCB McGraw-Hill, Boston.

¹⁴ Direct Methane and Nitrous Oxide emissions from full-scale wastewater treatment systems, Occasional Paper N 24, October 2009. Water Services Association of Australia.

$M_{sl,dry,y}$ — масса сухого вещества в осадке (т/год);

MCF_{sl} — коэффициент конверсии метана, зависящий от условий размещения осадка;

$DOC_{sl,dry}$ — разлагаемая органическая часть сухого осадка, размещенного в течение года. Рекомендованные МГЭИК значения составляют: 0,5 для илового осадка хозяйственно-бытовых сточных вод и 0,257 для промышленных сточных вод. Для конкретных очистных сооружений эти данные могут быть уточнены;

DOC_F — доля разлагаемого органического вещества, превращенного в биогаз. Рекомендованное МГЭИК значение составляет 0,5;

F — доля метана в биогазе. Рекомендованное МГЭИК значение составляет 0,5. Фактически, по данным¹⁵, доля метана в биогазе выше и составляет 0,6–0,75;

$\frac{16}{12}$ — соотношение молярных масс метана и углерода;

GWP_{CH_4} — потенциал глобального потепления для метана.

Если осадок очистных сооружений подсушивается при контролируемых аэробных условиях и затем размещается на полигоне с утилизацией выделяющегося метана, или используется для удобрения и улучшения состава почвы, то соответствующие выбросы метана считаются пренебрежимо малыми и для такой схемы обработки осадка принимаются

$$E_{CH_4,wwt,sl,y} = 0 \quad (11)$$

Рекомендуемые методикой МГЭИК величины коэффициента конверсии метана MCF_{sl} , зависящие от условий размещения осадка, приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Значения величины коэффициента конверсии метана в зависимости от условий размещения илового осадка

Место размещения илового осадка	MCF_{sl}
<u>Анаэробные контролируемые полигоны для размещения твердых отходов.</u> В данном случае существенным является контролируемое размещение осадка на полигоне с регулированием вымывания и пожаров. Такой полигон должен обладать одним из следующих признаков: покрытие грунтом или иным инертным материалом, механическое уплотнение, выравнивание отходов.	1,0
<u>Полу-анаэробные контролируемые полигоны для размещения твердых отходов.</u> Это также контролируемое размещение осадка на полигоне. Такой полигон должен обладать одним из следующих признаков: покрытие проницаемым материалом, система дренажа фильтрата, регулируемая вместимость, система вентиляции свалочных газов.	0,5
<u>Неконтролируемые полигоны для размещения твердых отходов (глубокие и/или с высоким уровнем грунтовых вод).</u> Это относится к таким полигонам, которые не отвечают приведенным выше критериям контролируемых полигонов и имеют глубину более 5 м и/или высокий уровень грунтовых вод. Например, это относится к случаям, когда отходами заполняют обводненный карьер, пруд или болото.	0,8
<u>Неконтролируемые полигоны для размещения твердых отходов.</u> Это относится ко всем остальным полигонам, которые не отвечают приведенным выше критериям контролируемых полигонов и имеют глубину менее 5 м. К этой категории относятся также иловые площадки с естественным и искусственным основанием.	0,4
<u>Неглубокие полигоны для размещения твердых отходов.</u> Это относится ко всем полигонам, не попадающим в перечисленные категории.	0,6

Определение выбросов метана в случае обработки осадка в новом метантенке

В случае обработке осадка в метантенке и последующего сжигания биогаза для получения тепловой или электрической энергии возможными источниками метана являются утечки последнего из метантенка и трубопроводов, а также неполное сгорание метана. Последним фактором

¹⁵ Очистка сточных вод: Пер. с англ. / Хенце М., Армозс П., Ля-Кур-Янсет Й., Арван Э. — М., Мир, 2006 — 480 с., илл.

обычно пренебрегают. Для определения парникового эффекта вследствие утечек метана из метантенка в методике МГЭИК предлагается следующее уравнение:

$$E_{CH_4,wwt,digest,y} = F_{biogas,y} * FL_{biogas,digest} * w_{CH_4,biogas,y} * GWP_{CH_4} * 0,001 \quad (12)$$

где

$E_{CH_4,wwt,digest,y}$ — выбросы метана вследствие утечек из метантенка (т CO₂-экв./год);

$F_{biogas,y}$ — количество биогаза, собранное на выходе из метантенка в год (м³);

$FL_{biogas,digest}$ — доля биогаза, который уходит в атмосферу из метантенка. МГЭИК рекомендует величину, равную 0,05 м³ биогаза, уходящего в атмосферу на 1 м³ произведенного биогаза;

$w_{CH_4,biogas,y}$ — концентрация метана в биогазе на выходе из метантенка (кг CH₄/м³);

GWP_{CH_4} — потенциал глобального потепления для метана;

0,001 — коэффициент пересчета тонн в килограммы.

На врезке 3 показан альтернативный вариант расчета.

Врезка 3.

Расчеты по уравнению (12) производить не всегда удобно, поскольку практическое определение концентрации метана в биогазе на выходе из метантенка является сложным. Предложим новое уравнение для определения парникового эффекта вследствие утечек метана из метантенка.

Предположим, что биогаз состоит исключительно из метана и углекислого газа, пренебрегая, тем самым, незначительными примесями водорода и сероводорода. Тогда состав биогаза может быть представлен как:

$$Biogas = F * CH_4 + (1 - F) * CO_2, \quad (12a)$$

где

F — массовая доля метана в биогазе, которая, как указано выше, может изменяться от 0,6 до 0,75.

Плотность метана при нормальных условиях составляет 0,7168 кг/м³. Плотность углекислого газа при тех же условиях равна 1,9768 кг/м³.

Отсюда, используя уравнение 12 а, получаем для плотности биогаза:

$$Density\ Biogas = F * 0,7168 + (1 - F) * 1,9768 = (1,9768 - 1,26 * F) \frac{kg}{m^3}.$$

Тогда, после округлений, для определения парникового эффекта вследствие утечек метана из метантенка можно применить уравнение:

$$E_{CH_4,wwt,digest,y} = F_{biogas,y} * FL_{biogas,digest} * (1,98 - 1,26 * F) * GWP_{CH_4} * F * 0,001 \quad (12b),$$

где

$E_{CH_4,wwt,digest,y}$ — выбросы метана вследствие утечек из метантенка (т CO₂-э/год);

$F_{biogas,y}$ — количество биогаза, собранное на выходе из метантенка в год (м³/год);

$FL_{biogas,digest}$ — доля биогаза, который поступает в атмосферу из метантенка. МГЭИК рекомендует величину, равную 0,05 м³ биогаза, уходящего в атмосферу, на 1 м³ произведенного биогаза;

(1,98 - 1,26 * F) — плотность биогаза (кг/м³);

F — массовая доля метана в биогазе;

GWP_{CH_4} — потенциал глобального потепления для метана;

0,001 — коэффициент пересчета килограммов в тонны.

Аэробная очистка

Выделение метана в зонах аэробной очистки происходит не должно. Однако в условиях перегруженности очистных сооружений или плохого управления процессом могут появляться области дефицита кислорода, где может происходить загнивание ила с выделением метана. Кроме того, в очищенной сточной воде, которая поступает в принимающий водный объект, содержатся остаточные концентрации органических веществ. Эти органические вещества могут, в зависимости от свойств водного объекта, подвергаться анаэробному загниванию с выделением метана.

В зоне аэробной очистки выбросы метана вследствие перегруженности очистных сооружений или плохого управления процессом могут быть определены по следующему уравнению.

$$E_{CH_4,wwt,a,y} = \sum_{i=1}^{365} \Delta COD_{a,i} * Q_{a,i} * B_{ww} * GWP_{CH_4} * MCF_{ww,o}, \text{ если } OR_i < 0,8 \quad (13)$$

$$E_{CH_4,wwt,a,y} = 0, \text{ если } OR_i \geq 0,8$$

где

$E_{CH_4,wwt,a,y}$ — выбросы метана вследствие перегруженности очистных сооружений или плохого управления процессом (т CO₂-экв./год);

$\Delta COD_{a,i}$ — изменение ХПК в сточной воде в аэробных процессах в течение i -того дня года (т/м³). Фактически, это разница между величиной ХПК в начале аэробной зоны очистки и величиной ХПК на сбросе в принимающий водный объект сточных вод в течение одного дня;

$Q_{a,i}$ — объем сточных вод, проходящий через аэробную часть очистных сооружений в течение i -того дня года (м³);

B_{ww} — удельный выход метана при распаде ХПК в сточной воде. Как показано выше, эта величина составляет 0,25 кг CH₄/кг ХПК;

$MCF_{ww,o}$ — коэффициент конверсии для метана, показывающий долю органического вещества, которая будет преобразована в метан. Для перегруженных и плохо управляемых очистных сооружений, в соответствии с таблицей 2, принимается коэффициент равный 0,3. Как уже указывалось выше, по мнению российских экспертов, эта величина существенно завышена;

GWP_{CH_4} — потенциал глобального потепления для метана;

OR_i — эффективность очистки по ХПК — соотношение между величиной окисленного органического вещества в аэробной зоне и количеством органического вещества, поступившим в аэробную зону в течение i -того дня год.

То есть,

$$OR_i = \frac{\Delta COD_{a,i}}{COD_{in,a,i}}, \text{ где } COD_{in,a,i} \text{ — величина ХПК на входе в аэробную зону.} \quad (14)$$

Задание величины $MCF_{ww,o}$

Хотя аэробные станции по очистке сточных вод проектируются, как правило, так, чтобы избежать загнивания ила и образования метана, МГЭИК рассматривает ряд факторов, которые могут привести к образованию анаэробных участков и, следовательно, к выбросам метана даже на аэробной станции. МГЭИК рекомендует выбор значения величины $MCF_{ww,o}$ на аэробных станциях в диапазоне от 0 до 0,4 в зависимости от условий работы станции. Подобные условия (конструктивные и операционные) рассмотрены во врезке 4.

Врезка 4.

- ✓ При проектировании КОС таким образом, чтобы сточные воды двигались, по возможности самотеком, необходимо обеспечить достаточные скорости потока и не допустить образования «мертвых зон» в отстойниках, аэротенках, осветлителях сточных вод.
- ✓ Следует организовать регулярное удаление сырого ила из первичных отстойников, чтобы избежать его загнивания.
- ✓ На установках с активным илом или биофильтрами следует организовать движение осадка таким образом, чтобы не создавалось пробок, ведущих к застреванию ила внутри сооружения. Это же относится к засорению биофильтров. Недостаток перемешивания в местах скопления осадка приводит к образованию анаэробных зон и выделению метана.
- ✓ Перегруженность КОС ведет к ухудшению гидравлических условий, уменьшению времени гидравлического удержания сточных вод. Это, в свою очередь приводит к недостаточной эффективности очистки. Значительные вариации в интенсивности потока, проходящего через очистные сооружения, усугубляют проблему.
- ✓ Недостаток растворенного кислорода в аэротенках может также привести к загниванию осадка.
- ✓ Вспучивание активного ила и образование хлопьев может привести к микроанаэробным условиям внутри хлопьев и вызвать выделение метана. Чтобы избежать этого, иногда прибегают к химическим добавкам.

Резюмируя, отметим, что для хорошо работающих очистных сооружений величина коэффициента конверсии метана $MCF_{ww,o} = 0$ (диапазон изменения от 0 до 0,1). Для тех сооружений, которые иногда работают с перегрузкой, или имеют другие указанные выше проблемы, величина $MCF_{ww,o}$ принимается равной 0,3. (Диапазон изменения от 0 до 0,4). Признаком неудовлетворительной работы методика МГЭИК рекомендует считать эффективность очистки по ХПК OR_i (уравнение 14).

Выбросы метана вследствие наличия остаточных количеств органических веществ очищенной сточной воде

Выбросы метана вследствие попадания в принимающий водный объект очищенной сточной воды с остаточными количествами органических веществ определяется по уравнению:

$$E_{CH_4,wwt,effl,y} = B_{ww} * GWP_{CH_4} * MCF_{ww,effl,y} * \sum_{i=1}^{12} COD_{effl,m} * Q_{effl,m}, \quad (15)$$

где

$E_{CH_4,wwt,effl,y}$ — выбросы метана вследствие попадания разлагаемых органических веществ в принимающий водный объект очищенных сточных вод (т CO_2 -экв./год);

B_{ww} — удельный выход метана при распаде ХПК в сточной воде. Как показано выше, эта величина составляет 0,25 кг CH_4 /кг ХПК;

GWP_{CH_4} — потенциал глобального потепления для метана;

$MCF_{ww,effl,y}$ — осредненный в течение года коэффициент конверсии метана, показывающий долю органического вещества, которая будет преобразована в метан;

$COD_{effl,m}$ — величина ХПК в очищенной сточной воде, сбрасываемой в принимающий водный объект в течение месяца m года y (т/м³ за месяц);

$Q_{effl,m}$ — объем сточной воды, сбрасываемой в принимающий водный объект очищенной сточной воды с остаточным количеством органических веществ (м³ за месяц).

Определение величины $MCF_{ww,effl,y}$

Среднегодовой множитель конверсии для метана определяется как произведение двух параметров: f_d , определяющего зависимость интенсивности образования метана от глубины водо-

ема, и $f_{T,y}$, определяющего температурную зависимость интенсивности образования метана. Таким образом,

$$MCF_{ww} = f_d * f_{T,y} \quad (16)$$

Для коэффициента f_d методология МГЭИК рекомендует следующие значения: при глубине водоема более 5 м величина f_d принимается равной 0,7, при глубине от 1 до 5 м — $f_d = 0,5$, при глубине менее 1 м — $f_d = 0$.

Множитель $f_{T,y}$ должен вычисляться так же как в уравнении (5) как интеграл от ежемесячных значений температурного коэффициента $f_{T,m}$ и с учетом того, как много кислорода было потрачено в этом месяце на разложение органических веществ, поступивших в водный объект со сточной водой. Таким образом,

$$f_{T,y} = \frac{\sum_{m=1}^{12} f_{T,m} * COD_{effl,m}}{12 * \sum_{m=1}^{12} COD_{effl,m}} \quad (17)$$

где

$f_{T,y}$ — среднегодовой коэффициент, определяющий интенсивность образования метана от температуры;

$f_{T,m}$ — среднемесячный коэффициент, определяющий интенсивность образования метана от температуры;

$COD_{effl,m}$ — величина ХПК в очищенной сточной воде, сбрасываемой в принимающий водный объект, осредненная за месяц (т/мес.).

Величина среднемесячного коэффициента, определяющего интенсивность образования метана от температуры, определяется с помощью уравнения (6).

По нашему мнению, включение в углеродный след предприятия КОС данной компоненты является спорным. Выбросы метана от сброса очищенных сточных вод в принимающий водный объект можно, скорее, отнести к углеродному следу агломерации в целом, которую предприятие КОС обслуживает. В том случае, если сточные воды сбрасываются с нормативными показателями содержания органических веществ, вклад предприятия КОС в этот компонент должен считаться нулевым. На КОС был уменьшен углеродный след агломерации, и сточная вода была очищена до нормативных значений. Учет рассматриваемого компонента и отнесение его «на счет» предприятия КОС может происходить, если сточные воды не были очищены до нормативных значений ХПК и сброшены в водный объект. В расчетах по уравнению (15) тогда должна фигурировать разница между фактическим значением ХПК и нормативным.

2.1.2 Определение выбросов закиси азота при размещении осадка

Как следует из таблицы 1, выбросы закиси азота (N_2O) учитываются для илового осадка в том случае, если иловый осадок вносится в почву для удобрения и улучшения ее структуры.

$$E_{N2O,sl,y} = M_{sl,dry,y} * w_{N,sl,y} * EF_{N2O,sl,land} * \frac{44}{28} * GWP_{N2O} \quad (18)$$

где

$E_{N2O,sl,y}$ — выбросы N_2O от внесенного в почву осадка в год (т CO_2 -экв./год);

$M_{sl,dry,y}$ — масса илового осадка, внесенного в почву в течение года (т);

$w_{N,sl,y}$ — массовая доля азота в иловом осадке, внесенном в почву (т N/т осадка);

$EF_{N_2O,sl,land}$ — коэффициент конверсии N_2O при разложении илового осадка, внесенного в почву. Используется средний коэффициент конверсии равный $0,01 \text{ т } N_2O\text{-N}/\text{т } N^{16}$;

$44/28$ — величина, обратная массовой доле азота в N_2O ;

GWP_{N_2O} — потенциал глобального потепления для закиси азота (298).

В том случае, если иловый осадок высушивается при контролируемых аэробных условиях, и затем размещается на полигоне или перерабатывается в новом анаэробном метантенке, обезвоживается, и хранится до окончательного размещения на полигоне, $E_{N_2O,sl,y} = 0$.

2.1.3 Определение выбросов парниковых газов, связанных с производством электроэнергии

Электроэнергия, потребляемая на КОС для очистки сточных вод, может быть получена из единой сети, произведена непосредственно на производственной площадке (например, с использованием биогаза) или куплена у конкретной электростанции (что нередко происходит в странах-членах ЕС).

Наиболее общее уравнение для определения выбросов парниковых газов следующее:¹⁷

$$E_{electr,y} = \sum_j C_{electr,j,y} * EF_{electr,j,y} \quad (19)$$

где

$E_{electr,y}$ — выбросы парниковых газов, связанные с потреблением электроэнергии в течение года y (т CO_2 /год);

$C_{electr,j,y}$ — количество электроэнергии, потребленное на площадке КОС в течение года y от источника j (МВт ч/год);

$EF_{electr,j,y}$ — среднегодовой коэффициент выбросов CO_2 для источника электроэнергии j в течение года y (т CO_2 /МВт ч);

j — количество источников электрической энергии.

В методике МГЭИК рассмотрено несколько сценариев:

1. Предприятие получает электроэнергию исключительно из сети.

В этом случае коэффициент выбросов CO_2 приравнивается к своему сетевому значению, установленному для данного региона или страны в целом. $EF_{electr,j,y} = EF_{electr,grid,y}$. Как указано в методике, в зависимости от наличия в сети «грязных» (ТЭЦ, работающие на ископаемом топливе) и «чистых» (гидроэлектростанции, ветровая и солнечная генерация, ТЭЦ, работающие на возобновляемом топливе) источников величина $EF_{electr,grid,y}$ может изменяться от $1,3 \text{ т } CO_2/\text{МВт ч}$ до $0,25 \text{ т } CO_2/\text{МВт ч}$.

2. Предприятие получает электроэнергию от одного или нескольких отдельных источников.

В том случае, если ни один из этих источников не работает по комбинированному циклу (с одновременным производством тепловой энергии), среднегодовой коэффициент выбросов CO_2 может быть рассчитан по уравнению:

$$EF_{electr,j,y} = \frac{\sum_n \sum_i FC_{n,i,t} * NCV_{i,t} * EF_{CO_2,i,t}}{\sum_n EG_{n,t}} \quad (20)$$

¹⁶ Stehfest, E. and Bouwman, A.F. N_2O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions. Nutr. Cycl. 29 Agroecosyst., in press.

¹⁷ «Tool to calculate baseline, project and/or leakage emissions from electricity consumption» (Version 01) <http://cdm.unfccc.int/methodologies/PAMethodologies/tools/am-tool-05-v1.pdf>

где

$EF_{electr,j,y}$ — коэффициент выбросов CO_2 для производства электроэнергии для источника j в течение года y ($t CO_2/MВт ч$);

$FC_{n,i,t}$ — количество ископаемого топлива i , потребленного на источнике электроэнергии n за период времени t (единица массы или объема);

$NCV_{i,t}$ — средняя низшая теплотворная способность ископаемого топлива i , использованного за период времени t (ГДж / единица массы или объема);

$EF_{CO_2,i,t}$ — средний коэффициент выбросов CO_2 ископаемого топлива i , использованного за период времени t ($t CO_2/ГДж$);

$EG_{n,t}$ — количество электроэнергии, сгенерированной источником n за период времени t (МВт ч);

n — количество источников энергии, экспортирующих энергию на площадку КОС;

i — типы ископаемого топлива, потребленного на источнике электроэнергии n за период времени t .

В том случае, если в производстве электроэнергии участвуют ТЭЦ, производящие одновременно и электрическую, и тепловую энергию, потребляемую на площадке, среднегодовой коэффициент выбросов CO_2 может быть рассчитан по уравнению:

$$EF_{CO_2,electr,j,y} = \frac{\sum_n \left[\sum_i (FC_{n,i,t} * NCV_{i,t}) - \frac{HG_{n,t}}{\mu_{boiler}} \right] * EF_{CO_2,i,t}}{\sum_n EG_{n,t}} \quad (21)$$

где

$EF_{CO_2,electr,j,y}$ — коэффициент выбросов CO_2 для производства электроэнергии для источника j в течение года y ($t CO_2/MВт ч$);

$FC_{n,i,t}$ — количество ископаемого топлива i , потребленного на источнике электроэнергии n за период времени t (единица массы или объема);

$NCV_{i,t}$ — средняя низшая теплотворная способность ископаемого топлива i , использованного за период времени t (ГДж / единица массы или объема);

$HG_{n,t}$ — количество тепла, произведенного на ТЭЦ n за период времени t (ГДж);

μ_{boiler} — коэффициент полезного действия котельной, которая производила бы тепло в отсутствии ТЭЦ;

$EF_{CO_2,i,t}$ — средний коэффициент выбросов CO_2 ископаемого топлива i , использованного за период времени t ($t CO_2/ГДж$);

$EG_{n,t}$ — количество электроэнергии, произведенной источником n за период времени t (МВт ч);

n — количество источников энергии, экспортирующих энергию на площадку КОС;

i — типы ископаемого топлива, потребленного на источнике электроэнергии n за период времени t .

В том случае, если источник электроэнергии (электростанция) работает на единственном виде ископаемого топлива i , коэффициент выбросов CO_2 , обусловленных его сжиганием, в уравнениях (20, 21) определяется как: $EF_{CO_2,n,t} = EF_{CO_2,i,t}$. Если электростанция работает на нескольких видах ископаемого топлива,

$$EF_{CO_2,n,t} = \frac{\sum_i FC_{n,i,t} * NCV_{i,t} * EF_{CO_2,i,t}}{\sum_i FC_{n,i,t} * NCV_{i,t}} \quad (22)$$

где

$EF_{CO_2,n,t}$ — средний коэффициент выбросов CO_2 вследствие сжигания ископаемых топлив на электростанции n за период времени t (т CO_2 /ГДж);

$FC_{n,i,t}$ — количество ископаемого топлива i , потребленного на источнике электроэнергии n за период времени t (единица массы или объема);

$NCV_{i,t}$ — средняя низшая теплотворная способность ископаемого топлива i , использованного за период времени t (ГДж / единица массы или объема);

$EF_{CO_2,i,t}$ — средний коэффициент выбросов CO_2 для ископаемого топлива i , использованного за период времени t (т CO_2 /ГДж);

n — количество источников энергии, поставляющих энергию на площадку КОС;

i — типы ископаемого топлива, потребленного электростанцией n за период времени t .

2.1.4 Определение выбросов парниковых газов, связанных с потреблением топлива

В том случае, если на производственной площадке для производственных нужд (получение пара, горячей воды, отопление) производится сжигание топлива, выбросы парниковых газов (CO_2) могут быть определены по уравнению¹⁸:

$$E_{FC,j,y} = \sum_i FC_{i,j,y} * COEF_{i,y} \quad (23)$$

где

$E_{FC,j,y}$ — выбросы в процессе сжигания j в течение года y (т CO_2 /год);

$FC_{i,j,y}$ — количество топлива типа i , использованного в процессе сжигания j в течение года y (единица массы или объема);

$COEF_{i,y}$ — коэффициент выбросов CO_2 от сжигания ископаемого топлива i , в течение года y (т CO_2 /единица массы или объема);

i — все виды топлива, использованного в процессе сжигания j в течение года y .

Величина коэффициента выбросов $COEF_{i,y}$ может быть рассчитана двумя способами в зависимости от наличия данных о типе ископаемого топлива i .

Способ 1: Коэффициент выбросов CO_2 $COEF_{i,y}$ вычисляется на основании данных о химическом составе топлива i следующим образом:

Если количество топлива $FC_{i,j,y}$ измеряется в единицах массы, то

$$COEF_{i,y} = w_{C,i,y} * 44/12 \quad (24a)$$

Если количество топлива $FC_{i,j,y}$ измеряется в единицах объема, то

$$COEF_{i,y} = w_{C,i,y} * \rho_{i,y} * 44/12 \quad (24b)$$

где

¹⁸ «Tool to calculate project or leakage CO2 emissions from fossil fuel combustion», (Version 02)
<http://cdm.unfccc.int/methodologies/PAMethodologies/tools/am-tool-03-v2.pdf>

$w_{C,i,y}$ — средняя массовая доля углерода в топливе типа i в течение года y (т С / единица массы топлива);

$\rho_{i,y}$ — средняя плотность топлива типа i в течение года y (т С / единица объема топлива);

44/12 — отношение молярных масс углекислого газа (CO_2) и углерода (С).

Способ 2: Коэффициент выбросов CO_2 $COEF_{i,y}$ вычисляется на основании данных о средней низшей теплотворной способности ископаемого топлива и коэффициента выбросов CO_2 следующим образом:

$$COEF_{i,y} = NCV_{i,y} * EF_{CO_2,i,y} \quad (24c)$$

где

$NCV_{i,y}$ — средняя низшая теплотворная способность ископаемого топлива i , за год y (ГДж / единица массы или объема);

$EF_{CO_2,i,y}$ — средний коэффициент выбросов CO_2 ископаемого топлива i за год y (т CO_2 /ГДж).

Первый способ является предпочтительным, так как обеспечивает большую точность расчетов.

Данный подход не учитывает выбросы других парниковых газов, происходящие при неполном сгорании топлива, полагая их незначительными по сравнению с выбросами углекислого газа.

В том случае, когда в качестве топлива используется иловый осадок, исходят из общего принципа учета выбросов углекислого газа при разложении (включая термическое) органических веществ. Это означает, что выбросы CO_2 не учитывают. Могут быть учтены выбросы других парниковых газов, выделяющихся при сжигании органических веществ (например, метана), но поскольку эти величины незначительны по сравнению с другими компонентами углеродного следа, ими можно пренебречь.

Полученная в результате сжигания осадка тепловая или электрическая энергия вычитается из общей потребности КОС в покупаемой энергии.

2.1.5 Определение выбросов парниковых газов, связанных с приобретением тепла внешних источников

В том случае, если потребность в тепле удовлетворяется за счет импорта из отдельного источника (например, котельной или ТЭЦ), расчет выбросов парниковых газов должен включать потери при транспортировке тепла. Среди методологий МГЭИК есть одна, предлагающая подобный подход.¹⁹ Как и в предыдущем случае, учитываются только выбросы CO_2 .

Выбросы CO_2 от потребленного тепла в течение года определяются по уравнению (для простоты считается, что тепло поставляется от единственного источника):

$$E_{CO_2,heat,y} = HC_y * EF_{CO_2,heat,y} * (1 + \delta_{net}) \quad (25)$$

где

$E_{CO_2,heat,y}$ — выбросы углекислого газа от потребленного тепла в течение года y (т CO_2 /год);

HC_y — величина потребленного тепла на площадке за год (ГДж);

¹⁹ Approved baseline and monitoring methodology AM0107 «New natural gas based cogeneration plant» <http://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/KI6WT9JQAOZU9181ESQN61EQHN6AJC>

$EF_{CO_2,heat,y}$ — коэффициент выбросов углекислого газа при генерации тепла на источнике — поставщике тепловой энергии (т CO₂-экв./ГДж);

δ_{net} — коэффициент потерь тепла в сети (в долях единицы).

Расчет по уравнению (25) легко можно выполнить, если источником является котельная. В этом случае можно считать, что

$$EF_{CO_2,heat,y} = \frac{EF_{CO_2,i,y}}{\mu_{boiler,i}},$$

следовательно,

$$E_{CO_2,heat,y} = HC_y * \frac{EF_{CO_2,i,y}}{\mu_{boiler,i}} * (1 + \delta_{net}) \quad (26)$$

где

$E_{CO_2,heat,y}$ — выбросы углекислого газа от потребленного тепла в течение года y (т CO₂/год);

$\mu_{boiler,i}$ — коэффициент полезного действия котельной, работающей на топливе i , в долях единицы;

$EF_{CO_2,i,y}$ — средний коэффициент выбросов CO₂ для ископаемого топлива i за год y (т CO₂-экв./ГДж);

δ_{net} — коэффициент потерь тепла в сети (в долях единицы).

Однако в том случае, когда теплоснабжение осуществляется от ТЭЦ, величину $EF_{CO_2,heat,y}$ определить несколько сложнее, поскольку ТЭЦ производит и тепло, и электроэнергию. В данном случае важным параметром является соотношение между всей произведенной тепловой и электрической энергией в течение года:

$$\theta_y = \frac{HG_{y,total}}{EG_{y,total} * 3,6} \quad (27)$$

где

θ_y — соотношение между произведенной тепловой и электрической энергией в течение года y . Эта величина для конкретной ТЭЦ является известной и одинаковой для всех потребителей;

$HG_{y,total}$ — общее количество тепла, произведенное на ТЭЦ в течение года y (ГДж);

$EG_{y,total}$ — общее количество электроэнергии, произведенное на ТЭЦ в течение года y и направленное в сеть (МВт ч);

3,6 — переводной коэффициент (ГДж/МВт ч).

Количество произведенного тепла можно связать с количеством потребленного топлива i через соотношение:

$$\frac{HG_y}{\mu_{heat,i}} + \frac{EG_y}{\mu_{electr,i}} = FC_{i,y} * NCV_{i,y} \quad (28)$$

где

$\mu_{heat,i}$ — коэффициент полезного действия по теплу ТЭЦ, работающей на топливе i ;

$\mu_{electr,i}$ — коэффициент полезного действия по электричеству ТЭЦ, работающей на топливе i ;

$FC_{i,y}$ — количество топлива типа i , использованного j в течение года y (единица массы или объема);

$NCV_{i,y}$ — средняя низшая теплотворная способность ископаемого топлива i , за год y (ГДж / единица массы или объема).

Подставляя в уравнение (28) величину HG_y вместо EG_y с использованием параметра θ_y получаем:

$$HG_y * \left(\frac{1}{\mu_{heat,i}} + \frac{1}{3,6 * \theta_y * \mu_{electr,i}} \right) = FC_{i,y} * NCV_{i,y}$$

С использованием уравнения (23) для одного типа топлива получаем:

$$E_{FC,y} = FC_{i,y} * COEF_{i,y} = FC_{i,y} * NCV_{i,y} * EF_{CO_2,i,y},$$

Отсюда, для каждого вида топлива i в отдельности можно получить

$$E_{FC,y} = HG_y * \left(\frac{1}{\mu_{heat,i}} + \frac{1}{3,6 * \theta_y * \mu_{electr,i}} \right) * EF_{CO_2,i,y}.$$

где

$E_{FC,y}$ — выбросы CO_2 , соответствующие произведенному на ТЭЦ теплу HG_y в течение года y (т CO_2 /год);

$EF_{CO_2,i,y}$ — средний коэффициент выбросов CO_2 ископаемого топлива i за год y (т CO_2 -экв./ГДж).

Отсюда, поскольку произведенное и потребленное тепло связаны соотношением: $HG_y = HS_y * (1 + \delta_{net})$, получаем окончательное уравнение для расчета выбросов CO_2 , обусловленных потреблением тепла HS_y , произведенного на ТЭЦ:

$$E_{FC,y} = HS_y * \left(\frac{1}{\mu_{heat,i}} + \frac{1}{3,6 * \theta_y * \mu_{electr,i}} \right) * EF_{CO_2,i,y} * (1 + \delta_{net}) \quad (29)$$

Величины коэффициентов выбросов CO_2 для ископаемого топлива различных видов можно найти в справочном руководстве МГЭИК²⁰, выпущенном на различных языках, включая русский, а также в других руководствах по вопросам оценки влияния ПГ на изменение климата²¹.

2.1.6 Определение выбросов парниковых газов, связанных с перевозкой илового осадка

В том случае, если иловый осадок транспортируется автотранспортом к местам захоронения или переработки, учитываются выбросы парниковых газов при сгорании автомобильного топлива. Наибольшее воздействие на парниковый эффект, в данном случае, оказывают выбросы углекислого газа, поэтому выбросами остальных парниковых газов пренебрегают.

Расчет выбросов CO_2 производится по уравнению:

$$E_{TR,sl,y} = \sum_j \sum_i N_{i,y} * D_{i,y} * F_{i,y} * NCV_{j,y} * EF_{j,y} \quad (30)$$

²⁰ Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories 2000, <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/>

²¹ ENERGY STAR Portfolio Manager Methodology for Greenhouse Gas Inventory and Tracking Calculations, http://www.energystar.gov/ia/business/evaluate_performance/Emissions_Supporting_Doc.pdf

где

$E_{TR,sl,y}$ — выбросы CO₂, связанные перевозкой илового осадка в течение года y (т CO₂/год);

$N_{i,y}$ — число поездок (транспортным средством типа i с одинаковой грузоподъемностью) для перевозки илового осадка в течение года y (поездок);

$D_{i,y}$ — среднее расстояние перевозки илового осадка транспортным средством типа i в течение года y (км);

$F_{i,y}$ — удельное потребление топлива транспортным средством типа i в течение года y (единица массы или объема / км);

$NCV_{j,y}$ — низшая теплотворная способность автомобильного топлива j в течение года y (ГДж / единица массы или объема);

$EF_{j,y}$ — коэффициент выбросов CO₂ автомобильного топлива j в течение года y (т CO₂/ГДж);

i — тип транспортного средства;

j — вид автомобильного топлива.

Число поездок автомобиля типа i определяется как:

$$N_{i,y} = \frac{Q_{sl,y}}{q_i} \quad (31)$$

где

$Q_{sl,y}$ — масса ила, произведенная на площадке и предназначенная к вывозу в течение года (т);

q_i — средняя грузоподъемность транспортного средства типа i в течение года y (т/поездка).

Численные значения коэффициентов выбросов CO₂ могут быть найдены в различных руководствах, включая руководство МГЭИК²² или пособие, разработанное для муниципалитетов²³.

2.2 Выделение закиси азота в процессе очистки сточных вод

Как было указано выше, данные методологии МГЭИК не рассматривают выбросы закиси азота (N₂O), хотя возможны ситуации (большое количество азотсодержащих соединений в поступающей на очистку сточной воде), когда фактор выбросов N₂O становится существенным. Рассмотрим существующие подходы к определению выбросов закиси азота при очистке сточных вод.

В хозяйственно-бытовых сточных водах содержится, в среднем, от 20 до 40 мг/дм³ соединений азота. В основном азот представлен в виде аммиака (NH₃) и ионов аммония (NH₄⁺). Кроме того, в сточных водах есть ряд азотсодержащих органических веществ, которые в процессе обработки превращаются в аммоний.

Перед сбросом в сточных вод в водный объект требуется значительно снизить в них содержание соединений азота, поскольку аммиак токсичен для рыб и других водных организмов. Также избыток азота в воде является одним из факторов, приводящих к эвтрофикации водоемов.

Наиболее распространенным способом очистки сточных вод от соединений азота является удаление азотистых соединений в аэрируемом реакторе с активным илом или на биофильтрах.

²² IPCC Guidebook: Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/bgp/2_3_Road_Transport.pdf

²³ Technical annex to the SEAP template instructions document: THE EMISSION FACTORS http://www.eumayors.eu/IMG/pdf/technical_annex_en.pdf

В этом случае азотистые соединения удаляются в процессе нитрификации и денитрификации. Подробнее о реакции нитрификации — на врезке 5.

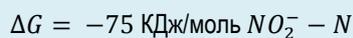
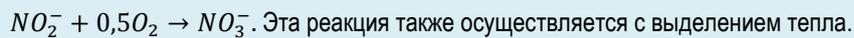
Врезка 5.

Нитрификация осуществляется в аэробной зоне с помощью бактерий. Процесс проходит в два этапа. На первом этапе аммоний окисляется до нитрита с помощью группы бактерий – окислителей аммония (АОВ), принадлежащих к родам *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*, *Nitrosopira*, *Nitrosovibrio*, and *Nitrosolobus*.

Окисление аммония под действием бактерий можно выразить следующей реакцией:



Далее, нитрит-окисляющие бактерии (NOB), к которым относятся бактерии родов *Nitrobacter*, *Nitrospira*, *Nitrosococcus* и другие осуществляют следующую реакцию, результатом которой является образование нитратов:



Выделяемое в процессе реакций тепло расходуется на деятельность нитробактерий и повышает температуру сточной воды.

Промежуточным продуктом первой из этих двух реакций, происходящей при участии аммоний-монооксигеназы как катализатора, является гидроксиламин (NH_2OH). Монооксигеназа является ферментом, который в результате различных метаболических путей присоединяет к веществу гидроксильную группу. Гидроксиламин, в свою очередь, под действием кислорода и фермента оксидоредуктазы окисляется до NO_2^- .²⁴ Также закись азота образуется в результате химической декомпозиции промежуточных продуктов, таких как NH_2OH , между реакцией преобразования NH_4^+ в NO_3^- ²⁵

Схематически реакция нитрификации выглядит следующим образом:

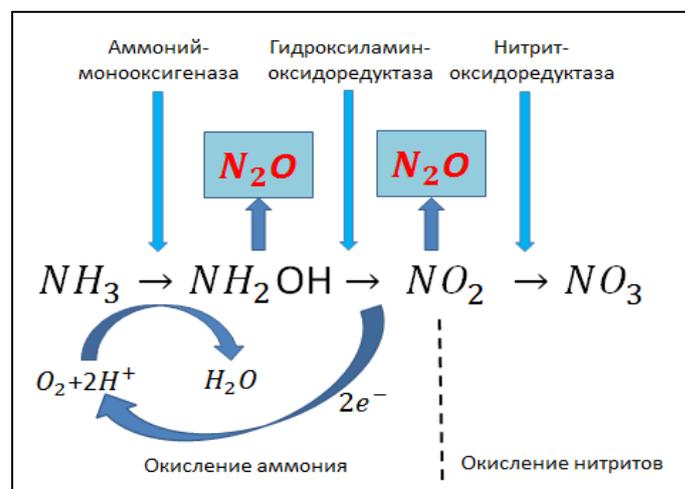


Рис. 2 – Схема реакции нитрификации

Другим путем образования N_2O являются реакции денитрификации, при которых нитраты (NO_3^-) и нитриты (NO_2^-) превращаются в газообразный азот, проходя при этом череду промежуточных преобразований. Результатом этих преобразований являются газообразные оксиды азота: монооксид азота (NO) и закись азота N_2O . Эти реакции также осуществляются в результате метаболизма бактерий рода *Paracoccus Denitrificans* и *Pseudomonads*.

²⁴ Hooper, A.B., Terry, K.R. «Hydroxylamine oxidoreductase of Nitrosomonas production of nitric oxide from hydroxylamine». *Biochimica et Biophysica Acta*, no. 571 (1979): 12-20.

²⁵ Wrage, N., Velthof, G.L., van Beusichem, M.L., Oenema, O. «Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide». *Soil Biology & Biochemistry* (PERGAMON), no. 33 (2001): 1723-1732.

Процесс выделения N_2O при денитрификации идет тем интенсивнее, чем меньше содержание органического вещества в сточной воде и растворенного кислорода при наличии нитритов. Наиболее интенсивно процесс идет в аноксидных²⁶ зонах при отсутствии кислорода. Схематически реакция денитрификации выглядит следующим образом:

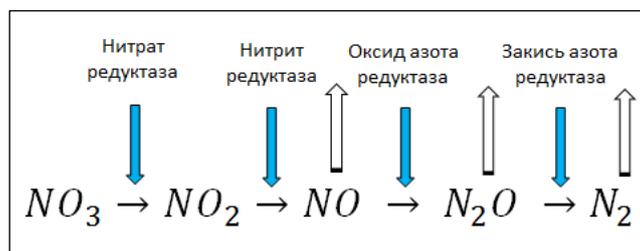


Рис. 3 – Схема реакции денитрификации

Поскольку выделение закиси азота – сильного парникового газа – является нежелательным, еще в середине 90-х годов было проведено множество исследований с целью определения факторов, влияющих на величину выбросов N_2O . Обзор результатов этих исследований приведен, например, в работе²⁷.

В частности, указывается, что на стадии нитрификации определяющими факторами являются концентрация растворенного в сточной воде кислорода, время гидравлического удержания активного ила, pH и концентрация растворенного органического вещества. Низкие концентрации растворенного кислорода и малое время удержания стимулируют образование N_2O в процессе нитрификации активного ила. Переход аммония в N_2O возрастает на 8 %, если концентрация растворенного кислорода опускается ниже 1 мг/дм³. Результаты экспериментов показывают, что риск значительного увеличения выделения закиси азота на стадии нитрификации существует при окислении органических веществ в условиях недостатка кислорода и малого времени удержания активного ила.

На стадии денитрификации образованию выбросов N_2O способствуют низкая величина отношения ХПК / $NO_3^- - N$, малое время удержания активного ила и низкий уровень pH. Среди этих параметров наиболее важной является величина ХПК/ $NO_3^- - N$, определяющая полноту денитрификации. В некоторых случаях, в качестве «дополнительного питания» для денитрифицирующих бактерий добавляются легко усвояемые источники углерода: метанол или этанол. Тогда процесс денитрификации будет завершен и выбросы N_2O будут минимальными.

В том случае, если нитрификация и денитрификация происходят последовательно в одном реакторе, как показано в работе²⁸ на модельной сточной воде, до 20–30 % аммония могут перейти в N_2O , если величина отношения ХПК / $NO_3^- - N$ составляет менее чем 3,5. При величине этого отношения равной 5 денитрификация проходила полностью и величина выбросов N_2O была незначительной.

На реальной хозяйственно-бытовой сточной воде в лабораторных условиях²⁹ было показано, что в закись азота может превращаться до 4 % азота, удаленного из сточной воды, причем ос-

²⁶ Различия между анаэробными и аноксидными зонами состоит в том, что в анаэробных зонах – жесткие бескислородные условия, а в аноксидных – кислород присутствует, но в растворенном, в связанном виде – в виде нитритов и нитратов (NO_2 , NO_3).

²⁷ Nitrous oxide production in nitrogen removal process treating domestic sewage from combined sewer system, Pages 153-164, K. Hanaki, T. Nakamura, T. Matsuo. In the book «Advances in Water and Wastewater Treatment Technology Molecular Technology, Nutrient Removal, Sludge Reduction and Environmental Health» Copyright © 2001 Elsevier B.V. Edited by: Tomonori Matsuo, Keisuke Hanaki, Satoshi Takizawa and Hiroyasu Satoh

²⁸ Itokawa H, Hanaki K, Matsuo T. Nitrous oxide production in high-loading biological nitrogen removal process under low COD/N ratio condition. Water Res. 2001 Mar;35(3):657-64

²⁹ Wunderlin P, Mohn J, Joss A, Emmenegger L, Siegrist H. Mechanisms of N_2O production in biological wastewater treatment under nitrifying and denitrifying conditions. Water Res. 2012 Mar 15; 46(4):1027-37. Epub 2011 Dec 8.

новным источником N_2O оказался процесс нитрификации. Концентрация растворенного N_2O – N составила $1,85 \text{ мг/дм}^3$. В процессе денитрификации часть растворенной закиси азота в конце аэрации перешла в газообразную форму азота. В работе делается вывод, что регулируя процесс денитрификации можно ограничивать выбросы N_2O (подробнее см. врезку 6).

Врезка 6.

Выбросы закиси азота в процессах нитрификации и денитрификации при очистке сточных вод до сих пор остаются не до конца понятным явлением, которое не поддается адекватному математическому моделированию. По крайней мере, такой вывод сделан авторами доклада³⁰ на прошедшей в конце февраля 2012 года в Канаде конференции WWTmod2012. Ими были опробованы 4 математических модели и проведены лабораторные эксперименты по определению веществ, сопутствующих процессам нитрификации и денитрификации при очистке сточных вод. Все модели вполне адекватно описывали поведение ионов NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , но были не в состоянии воспроизвести измеренные количества N_2O .

Подобная неопределенность и неудачи в построении теоретических моделей в сочетании с высоким потенциалом глобального потепления закиси азота (298) стимулируют исследователей к созданию полуэмпирических моделей, основанных на экспериментальных данных.

Обширное исследование на эту тему было проведено в 2009-2011 годах в Колумбийском университете³¹. В литературном обзоре, приведенном в данной работе, содержатся данные о том, что из общей нагрузки очистных сооружений по азоту (общий азот по Кьельдалю – TKN) до 7 % может выделяться в виде газообразной закиси азота и монооксида азота. В работе исследовано 12 очистных сооружений в США с биологическим (нитрификация – денитрификация) удалением азотистых соединений. Результаты показали, что выбросы N_2O в зависимости от величины ΔTKN_{pr} — значений общего количества азота, удаленного в процессе очистки. Данная величина составила по массе от 0,01 % до 3,3 % ΔTKN_{pr} .

Если до 2009 года считалось (данные Агентства по охране окружающей среды США (USEPA))³², что, главным образом N_2O выделяется в аноксидной зоне очистных сооружений с активным илом, то результаты исследования Колумбийского университета показали, что главным источником закиси азота является аэрируемая зона реактора.

Результаты цитированной работы были использованы специалистами Агентства по охране окружающей среды США (USEPA) при разработке методологии определения выбросов парниковых газов для ряда биологических процессов /производств: размещение отходов, очистка сточных вод и производство этанола³³. Рекомендуемое USEPA уравнение для расчета выбросов N_2O , модифицированное нами для учета месячных вариаций качества сточных вод, следующее:

$$E_{N_2O,wwt,y} = \sum_{i=1}^{12} (Q_{wwt,i} * TKN_{infl,i}) * EF_{N_2O} * \frac{44}{28} * GWP_{N_2O} * 10^{-6} \quad (32)$$

где

$E_{N_2O,wwt,y}$ — выбросы N_2O в процессе биологической очистки в течение года (т CO_2 /год);

³⁰ Bing-Jie Ni, Zhiguo Yuan, Kartik Chandran, Peter A. Vanrolleghem, Sudhir Murthy «Evaluating mathematical models for N_2O production by ammonia-oxidizing bacteria: towards a unified model».

³¹ «Greenhouse Nitrogen Emission from Wastewater Treatment Operations» Interim Report by: Kartik Chandran, Ph.D. Department of Earth and Environmental Engineering Director, CUBES Program Columbia University 2010 http://www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&sqi=2&ved=0CCsQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.werf.org%2F%2F_FinalReportPDFs%2FU%2FU4R07a.aspx&

³² U.S. EPA (2009) Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2006, EPA 430-R-08-005. Washington, D.C. <http://www.epa.gov/climatechange/ghgemissions/usinventoryreport.html>

³³ Greenhouse Gas Emissions Estimation Methodologies for Biogenic Emissions from Selected Source Categories: Solid Waste Disposal, Wastewater Treatment, Ethanol Fermentation. U.S. Environmental Protection Agency, Sector Policies and Programs Division, Measurement Policy Group. Submitted by: RTI International. December, 2010. http://www.epa.gov/ttnchie1/efpac/ghg/GHG_Biogenic_Report_draft_Dec1410.pdf

$Q_{wwt,i}$ — объем сточной воды, поступающей на биологическую очистку в течение месяца i года у (м^3);

$TKN_{infl,i}$ — концентрация общего азота (по Кьельдалю) в сточной воде, поступающей на очистные сооружения (мг/дм^3 или г/м^3);

EF_{N_2O} — коэффициент конверсии N_2O . По рекомендациям МГЭИК¹⁰ он принимается равным 0,005 г N , который поступает в атмосферу как N_2O / г TKN_{infl} . Разброс величин коэффициента составляет 0,0005 – 0,25. По этой причине, данная величина требует уточнения (см. раздел 2.3);

44/28 — коэффициент пересчета (величина, обратная массовой доле азота в N_2O);

GWP_{N_2O} — потенциал глобального потепления для N_2O (298);

10^{-6} — коэффициент пересчета граммов в тонны.

Из приведенного выше уравнения следует, что специалисты USEPA использовали среднее значение выбросов N_2O равное $0,005 * 44/28 = 0,0078 TKN_{infl}$ или 0,78 % TKN_{infl} на входе в очистные сооружения.

В руководстве US EPA³³ приведены упрощенные уравнения для оценки коэффициента конверсии N_2O проектируемых очистных сооружений. В этих оценках используется коэффициент конверсии N_2O EF_{N_2O,PE_US} , нормированный на величину популяционного эквивалента PE. Значения коэффициентов конверсии следующие:

$EF_{N_2O,PE_US} = 7,0 \text{ г} \frac{\text{N}_2\text{O}}{\text{PE}_{US}}$ в год, для очистных сооружений, удаляющих азот биологическими методами;

и

$EF_{N_2O,PE_US} = 3,2 \text{ г} \frac{\text{N}_2\text{O}}{\text{PE}_{US}}$ в год, для очистных сооружений, удаляющих азот небактериальными методами (без целенаправленной денитрификации).

При использовании данных уравнений следует иметь в виду, что американский популяционный эквивалент определяется как 100 галлонов (378 литров) сточной воды на человека в сутки. В Европе и Российской Федерации используется другое значение популяционного коэффициента: 200 литров сточной воды или 60 г БПК₅ (по органическому веществу) на человека в сутки.

Уравнение (32) может быть модифицировано в уравнение (32а), если коэффициент конверсии N_2O нормировать не к величине общего азота в сточной воде, поступающей на очистные сооружения, а величине удаленного в процессе денитрификации общего азота. Такое нормирование лучше отражает физику процесса и, кроме того, по величине коэффициента конверсии, нормированного подобным образом, имеется много экспериментальных данных (см. раздел 2.3 ниже). Тогда уравнение для расчета выбросов N_2O выглядит следующим образом:

$$E_{N_2O,wwt,y} = \sum_{i=1}^{12} \left(Q_{wwt,i} * (TKN_{infl,i} - TKN_{effl,i}) \right) * EF_{N_2O/\Delta N} * \frac{44}{28} * GWP_{N_2O} * 10^{-6} \quad (32a),$$

где

$TKN_{effl,i}$ — концентрация общего азота (по Кьельдалю) в очищенной сточной воде (мг/дм^3 или г/м^3);

$EF_{N_2O/\Delta N}$ — коэффициент конверсии N_2O (по общему азоту) нормированный на величину удаленного азота в процессе денитрификации. Подробности об измерениях и величине этого коэффициента содержатся в разделе 2.3;

Остальные обозначения – те же, что и в уравнении (32).

2.3 Уточнения методологий МГЭИК

В последнее десятилетие появилось множество работ, главным образом экспериментальных, в которых уточняются методологии МГЭИК. Эти уточнения, как правило, сводятся к определению коэффициентов конверсии метана и закиси азота. Так, в работе³⁴, выполненной Water Services Association of Australia (WSAA), проведены лабораторные и натурные исследования выбросов метана и закиси азота.

Выбросы метана в процессе очистки сточных вод исследовались на четырех полномасштабных очистных сооружениях:

- ✓ Берд-ин-Хэнд, Аделаида Хиллз, Южная Австралия, производительность — 1,2 тыс. м³/сутки, хозяйственно-бытовые и промышленные сточные воды. Очистные сооружения состоят из двух открытых (параллельных) аэробно-анаэробных накопителей, аэрируемого отстойника (2 механических поверхностных аэратора) и 7 прудов-усреднителей.
- ✓ Западные очистные сооружения 25W, Мельбурн, производительность — 230 тыс. м³/сутки, хозяйственно-бытовые и промышленные сточные воды. Очистные сооружения состоят из закрытого анаэробного отстойника (CAL) емкостью 650 тыс. м³ со сбором биогаза, который используется для получения энергии, аэрируемого отстойника емкостью 713 тыс. м³ (50 механических поверхностных аэраторов), установки с активным илом (ASP), принимающей около 200 тыс. м³/день от CAL и 9 прудов-усреднителей.
- ✓ Северные главные очистные сооружения, Сидней, производительность — 275 тыс. м³/сутки, хозяйственно-бытовые и промышленные сточные воды. Очистные сооружения состоят из четырех первичных отстойников (гидравлическое удерживание примерно 0,5 часа), илоуплотнителей, аэробного сбразивания, механического обезвоживания ила на центрифугах.
- ✓ Пивзавод Фостерз, Ятала, Квинсленд. Производительность — 3,3 тыс. м³/сутки. Очищаются исключительно сточные воды пивоваренного производства. Очистные сооружения включают, 4 UASB реактора³⁵ по 0,66 тыс. м³ каждый, два флотатора, обезвоживание осадка.

На каждом очистном сооружении были проведены по 4 опыта с августа по ноябрь, во время которых определялись выбросы метана в различных зонах очистных сооружений и величины ХПК. Результаты показали, что наибольшая генерация метана наблюдалась на Западных очистных сооружениях в анаэробном отстойнике CAL. Поскольку генерируемый там метан собирался и использовался как биогаз, в атмосферу выделялось лишь 7–11 % всего метана, который попадал в растворенном виде на установку с активным илом и аэрируемый отстойник и там выделялся в атмосферу. Поскольку Западные очистные сооружения Мельбурна относятся к крупным, даже это количество является значительным источником парниковых газов (13 400–21 600 т CO₂-экв./год).

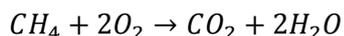
Измерения показали, что на участке CAL очистных сооружений выделяется 0,22–0,23 кг CH₄ на 1 кг удаленного ХПК. В контексте методологии МГЭИК (уравнения 3–5, таблица 2), это свидетельствует о том, что величина коэффициента конверсии для метана MCF_{ww} составляет 0,87–0,93, а не максимальное значение 0,7 (уравнения 4–5) или 0,8 (таблица 2), рекомендованные МГЭИК.

³⁴ WSAA Occasional Paper No.24 - Direct Methane and Nitrous Oxide emissions from full-scale wastewater treatment systems (2009). https://www.wsaa.asn.au/WSAAPublications/Pages/Occasional-Papers.aspx#_UFOG511qJm4

³⁵ Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) — реактор с восходящим потоком через слой гранулированного анаэробного ила.

Измеренные величины выбросов метана в аэрируемом отстойнике тех же очистных сооружений соответствуют величине $MCF_{ww} = 0,03-0,20$, что соответствует «мелкому анаэробному отстойнику» таблицы 2, рекомендованной МГЭИК.

На Северных главных очистных сооружениях Сиднея метан практически не выбрасывается в атмосферу. Возможной причиной, как указывается в цитируемом отчете WSAА, является поглощение метана в первичных отстойниках в результате деятельности метанотрофных бактерий в поверхностном слое в условиях наличия кислорода³⁶. Для этих бактерий метан служит источником углерода и энергии. Процесс окисления метана идет в соответствии с уравнением



Данный эффект хорошо описан, например, в работах Аллы Ножевниковой (Институт микробиологии им. С. Н. Виноградского РАН) применительно к выделению метана с полигонов ТБО. Степень окисления метана в поверхностном аэрируемом слое растет с температурой и может составлять 10–100 %. При отрицательных температурах деятельность метанотрофных бактерий прекращается. В таблице 4 представлены откорректированные коэффициенты конверсии MCF_{ww} для метана для четырех исследованных очистных сооружений.

Таблица 4 – Коэффициенты конверсии метана, полученные экспериментально на полномасштабных очистных сооружениях

Очистные сооружения	Комментарий	MCF_{ww}	Диапазон изменения / комментарий
Берд-ин-Хэнд, Аделаида Хиллз, 1,2 тыс.м ³ /сутки	Аэрируемый отстойник, мощность аэрации около 1,5 Вт/м ³	0,10	0,03–0,20
Западные очистные сооружения 25W, Мельбурн, 230 тыс. м ³ /сутки	Закрытый анаэробный отстойник 8 м глубиной	0,90	0,87–0,93
Северные главные очистные сооружения, Сидней, 275 тыс. м ³ /сутки	Первичные отстойники глубиной 3,2 м с временем гидравлического удержания 0,5 часа	0,00	Возможное окисление метана в верхнем слое первичных отстойников
Пивзавод Фостерз, Ятала, Квинсленд. Производительность — 3,3 тыс. м ³ /сутки	UASB – реактор, 5,5 м глубиной	1,00	0,80–1,0

Исследования по выбросам NO₂ от сооружений биологической очистки были проведены на семи полномасштабных очистных сооружениях, отличающихся мощностью, конструкцией и глубиной очистки от соединений азота. Эти сооружения следующие:

- ✓ Очистные сооружения о. Брисбан, Квинсленд. Производительность — 38 тыс. м³/сутки, гидравлическое удержание ила около 13 суток. Анаэробный контактный реактор, 2 параллельных циркуляционных окислительных канала, вторичное осаждение, механическое уплотнение и обезвоживание илового осадка. Концентрация общего азота на выпуске менее 3 мг/дм³.
- ✓ Очистные сооружения г. Тувумбы, Квинсленд. Производительность — 10 тыс. м³/сутки, гидравлическое удержание ила около 20 суток. Два вытянутых, разделенных на отсеки Йоханнесбургских реактора³⁷, погружные ОК1 миксер-аэраторы, вторичное осаждение, механическое уплотнение и обезвоживание илового осадка, аэробное сбразивание осадка. Концентрация общего азота на выпуске менее 5 мг/дм³.
- ✓ Очистные сооружения Вудман пойнт, г. Перт, Западная Австралия. Производительность — 137 тыс. м³/сутки, гидравлическое удержание ила около 16 суток. Первичное осаждение, последовательно-циклический реактор SBR (4 отсека) с мелкопузырчатой аэрацией

³⁶ По мнению российских экспертов, другой возможной причиной является малое время пребывания осадка в первичных отстойниках.

³⁷ Йоханнесбургский процесс — последовательное чередование в удлиненном бассейне аноксидной, анаэробной, аноксидной и аэробной зон.

и биоселектором, механическое уплотнение и обезвоживание илового осадка, анаэробное сбраживание осадка. Концентрация общего азота на выпуске менее 15 мг/дм³.

- ✓ Очистные сооружения Субиако, г. Перт, Западная Австралия. Производительность — 63 тыс. м³/сутки, гидравлическое удержание ила около 13 суток. Первичное осаждение, 11 закрытых модифицированных реакторов Людзака-Этингера MLE³⁸ (параллельно) с мелкопузырчатой аэрацией, вторичное осаждение, механическое уплотнение и обезвоживание илового осадка, стабилизация осадка известью. Концентрация общего азота на выпуске менее 12 мг/дм³.
- ✓ Очистные сооружения г. Аделаида, Южная Австралия. Производительность — 49 тыс. м³/сутки, гидравлическое удержание ила около 8 суток. Первичное осаждение, 2 пленочных биореактора с активным илом, один реактор MLE (параллельно) с мелкопузырчатой аэрацией, вторичное осаждение, механическое уплотнение и анаэробное сбраживание осадка. Концентрация общего азота на выпуске менее 11 мг/дм³.
- ✓ Западные очистные сооружения 25W, Мельбурн, производительность — 230 тыс. м³/сутки, гидравлическое удержание ила около 15 суток. Очистные сооружения состоят из закрытого анаэробного отстойника (CAL) емкостью 650 м³ со сбором биогаза, который используется для получения энергии, аэрируемого отстойника емкостью 713 м³ (50 механических поверхностных аэраторов), 1 реактор MLE с мелкопузырчатой аэрацией и 9 прудов-усреднителей. Концентрация общего азота на выпуске менее 13 мг/дм³.
- ✓ Очистные сооружения Санкт-Мари, Сидней, производительность 25 тыс. м³/сутки, гидравлическое удержание ила около 14 суток. Очистные сооружения состоят из двух параллельных линий. Первая линия включает первичное осаждение, реактор Барденфо³⁹, биореактор с мелкопузырчатой аэрацией, вторичное осаждение. Вторая линия включает пре-ферментацию, реактор A2/O⁴⁰ с мелкопузырчатой аэрацией, вторичное осаждение, третичную фильтрацию, уплотнение ила, аэробное сбраживание, иловый отстойник и механическое обезвоживание.

Коэффициенты конверсии N₂O (по общему азоту), нормированные на величину удаленного азота в процессе денитрификации, полученные в результате 20 серий опытов на 7 перечисленных выше очистных сооружениях, представлены в таблице 5.

Жирным шрифтом показаны осредненные значения коэффициентов конверсии, а в скобках — разброс значений. При сравнении характеристик очистных сооружений по удалению азота, отмечается, что наибольшие коэффициенты конверсии закиси азота получены на тех сооружениях, где наблюдается высокая концентрация общего азота в очищенной сточной воде. Этот факт коррелируется с приведенными ранее данными о том, что наибольшие выбросы закиси азота сопровождают неполную денитрификацию.

Минимальное значение коэффициента конверсии N₂O составило 0,006, а максимальное — 0,253 кг N₂O — N/ΔN. Средняя арифметическая величина по 20 опытам составила $EF_{N_2O/N} = 0,035 \pm 0,027$ кг N₂O — N/ΔN. Эта величина близка к максимальному значению, полученному в работе — $EF_{N_2O/N} = 0,033$ кг N₂O — N/ΔN. Однако, ряд значений, приведенных в таблице 5, имеет значительные выбросы и нуждается в статистической обработке.

³⁸ Modified Ludzack-Ettinger Process (MLE) — Модифицированный процесс Людзака-Этингера — этот процесс представляет собой модификацию обычного процесса очистки с активным илом, где аноксидная зона расположена перед аэробной. Процесс использует внутреннюю рециркуляцию переносящую нитраты, созданные в процессе нитрификации в аэробной зоне со смесью активного ила и сточной воды на вход в аноксидную зону. Степень удаления нитратов в аноксидной зоне зависит от рециркуляционного потока и наличия доступных органических веществ во входном потоке.

³⁹ Процесс Барденфо предусматривает обработку сточных вод последовательно в аноксидной, анаэробной и двух аэробных зонах, разделенных анаэробной.

⁴⁰ Процесс A2/O предусматривает обработку сточных вод в аноксидной, анаэробной и аэробной зонах.

Таблица 5 – Коэффициенты конверсии N₂O (по общему азоту), нормированные на величину удаленного азота в процессе денитрификации

Очистные сооружения	$EF_{N_2O/N}$ (кг N ₂ O – N/ΔN) — коэффициент конверсии N ₂ O по общему азоту нормированный на величину удаленного азота в процессе денитрификации			
	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 4
о. Брисбан	0,008 (0,005-0,016)	0,006 (0,003-0,012)	0,013 (0,008-0,023)	0,006 (0,003-0,013)
г. Тувумба	0,014 (0,008-0,025)	0,021 (0,011-0,039)	0,011 (0,004-0,025)	
Вудман-пойнт	0,010 (0,009-0,021)	0,017 (0,015-0,034)	0,071 (0,064-0,146)	
Субияко	0,027 (0,018-0,045)			
Аделаида	0,022 (0,014-0,034)	0,078 (0,056-0,134)	0,007 (0,004-0,010)	0,096 (0,068-0,166)
Мельбурн	0,253 (0,177-0,451)	0,010 (0,005-0,021)	0,006 (0,003-0,011)	
Санкт-Мари	0,018 (0,014-0,036)		0,010 (0,007-0,019)	

Для выбраковки результатов был использован предложенный в работе⁴¹ критерий:

$$X_b = \bar{X} * \left(1,55 + 0,8 * \log \frac{n}{10} * \sqrt{\varepsilon - 1}\right),$$

где

X_b – граница цензурирования выборки;

\bar{X} – среднееарифметическое значение по выборке;

n – число значений в ряде (число наблюдений);

ε – значение эксцесса распределения.

Расчеты границы цензурирования по данному уравнению, как показано в цитированной книге, дают хорошие результаты при исключении недостоверных значений для широкого круга распределений, отличных от нормального. Применяя этот критерий, получаем среднее значение коэффициента конверсии закиси азота равным $EF_{N_2O/N} = 0,013$ кг N₂O – N/ΔN. Данная величина будет использоваться в дальнейших расчетах.

Данная величина в 2,6 раз больше, коэффициента конверсии, рекомендованного в методике МГЭИК 2006 года. Там величина $EF_{N_2O/N} = 0,005$ кг N₂O – N/ΔN. Однако, в последнем (февраль 2013 года) исследовании ЕРА⁴² (раздел отходы) признается, что коэффициенты конверсии нуждаются в уточнении, причем в качестве источника этого уточнения предлагаются те же материалы, которые были использованы в нашей работе.

Исследование WSAА показало также, что не менее 95 % образовавшегося N₂O выбрасывается в атмосферу.

Интересны также полученные в работе данные о том, в каких зонах (анаэробной, аэробной, аноксидной) наблюдается наибольшая генерация N₂O. Оказывается, что образование закиси азота всегда наблюдается в анаэробной и аноксидной зонах. В первичном и вторичном отстойниках закись азота также образуется, но в гораздо меньших количествах. Наиболее значительны вариации в интенсивности выделения закиси азота в аэробных зонах. Там могут наблюдаться как значительные интенсивности образования газа, так и полное его отсутствие. Процессы, происходящие в данной области очень чувствительны к изменениям параметров сточной воды: нагрузки по азоту, рН, концентрации растворенного кислорода, наличия окисляемых органических веществ.

⁴¹ Новицкий П. В., Зограф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений. – 2-е издание, переработанное и дополненное – Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1991, – 304 стр.

⁴² <http://www.epa.gov/climatechange/ghgemissions/usinventoryreport.html> [Электронный ресурс]

3. Пошаговый расчет углеродного следа очистных сооружений

Прежде, чем проводить расчеты, следует определить приближение, при котором будет рассчитываться углеродный след предприятия КОС. Скорее всего, в расчет войдут сами производственные площадки, где расположены очистные сооружения, плюс полигоны, где размещается иловый осадок, транспорт, перевозящий осадок на полигоны (и прочий транспорт предприятия), административные здания, где работают сотрудники предприятия.

В качестве временного интервала для определения величины углеродного следа, по умолчанию, выберем один год.

Шаг 1. Углеродный след, обусловленный импортируемой электроэнергией, потребляемой на производственной площадке и в офисных помещениях

В том случае, если электроэнергия потребляется из централизованной сети, расчет производится по схеме, приведенной в таблице 6.

Таблица 6 – Расчет выбросов парниковых газов при потреблении электроэнергии из сети

Импортированная электроэнергия (МВт ч/год)	Коэффициент выбросов CO ₂ для потребленной электроэнергии (т CO ₂ /МВт ч)	Выбросы парниковых газов при потреблении электроэнергии из сети (т CO ₂ /год)
1	2	3
A	B	A*B

В 2010 году Европейский Банк Реконструкции и Развития (ЕБРД) выполнил исследование-прогноз величин коэффициентов выбросов парниковых газов (колонка 2) до 2020 года для энергосистем Российской Федерации⁴³. Значения коэффициентов до 2016 года приведены в таблице 7. Различия в коэффициентах обусловлены разным «набором» генерирующих мощностей и других особенностей региона (атомная энергетика, тепловая генерация, в зависимости от вида топлива, гидроэлектростанции, протяженность ЛЭП, потери в сети и пр.)

Таблица 7 – Коэффициенты выбросов CO₂ по энергосистемам и по России в целом

Год / Энергосистема	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
$EF_{electr,j,y}$ (т CO ₂ /МВт ч)								
Россия	0,617	0,616	0,624	0,642	0,632	0,629	0,640	0,632
ОЭС Центра	0,576	0,593	0,574	0,614	0,635	0,623	0,614	0,620
ОЭС Востока	0,661	0,559	0,834	0,968	0,948	0,950	0,969	0,968
ОЭС Северо-Запада	0,448	0,425	0,419	0,420	0,407	0,397	0,417	0,423
ОЭС Сибири	1,003	1,006	0,993	0,949	0,955	0,949	0,960	0,954
ОЭС Юга	0,376	0,352	0,369	0,374	0,379	0,428	0,413	0,373
ОЭС Урала	0,576	0,582	0,609	0,649	0,581	0,564	0,588	0,573
ОЭС Средней Волги	0,356	0,359	0,362	0,387	0,375	0,380	0,385	0,382

В том случае, если источники электроэнергии известны, величины коэффициентов выбросов (Таблица 6, столбец 2) могут быть получены непосредственно по запросу у руководства элек-

⁴³ Европейский банк реконструкции и развития. «Динамика развития коэффициентов выбросов углерода при производстве электрической энергии», 14 октября 2010 года.

http://www.ebrd.com/downloads/sector/eec/Baseline_Study_Russia_Final_Russian.pdf

тростанции или электроснабжающей компании, что уточнит расчет выбросов парниковых газов. Если источником электроэнергии является тепловая генерация, и тип и количество используемого топлива известны, то можно величины коэффициентов выбросов рассчитать самостоятельно по уравнениям (20–22), приведенных в разделе 2. В том случае, если речь идёт о возобновляемых источниках энергии, коэффициент выбросов парниковых газов принимается равным нулю.

Отметим, что на этом шаге мы определяем только углеродный след, связанный с потреблением электрической энергии от внешних источников.

Шаг 2. Углеродный след, обусловленный потреблением тепловой энергии

Шаг 2.1. Тепло генерируется непосредственно на производственной площадке

В том случае, если на производственной площадке для производственных нужд (получение пара, горячей воды, отопление) производится сжигание ископаемого топлива или отходов, выбросы парниковых газов (CO₂) определяются по схеме, приведенной в таблице 8.

Таблица 8 – Расчет выбросов парниковых газов при сжигании топлива или отходов

Сожженное топливо определенного вида (т или м ³) в год	Средняя низшая теплотворная способность топлива (ГДж/т или м ³)	Коэффициент выбросов CO ₂ для топлива (т CO ₂ /ГДж)	Выбросы парниковых газов при сжигании топлива (т CO ₂ /год)
1	2	3	4
A	B	C	A*B*C

Если на площадке сжигается несколько видов ископаемого топлива или отходов, то величина выбросов парниковых газов рассчитывается в колонке 4 для каждого вида топлива отдельно, а потом полученные величины суммируются.

Величины теплотворных способностей различных видов топлив, а также коэффициенты выбросов CO₂ могут быть найдены во многих источниках. В таблице 9 приведены, в частности, данные из материалов Соглашения мэров⁴⁴, объединяющих более 4000 городов, и заключенного в интересах устойчивой энергетики. Большинство материалов приведено, в том числе, и на русском языке. Все данные соответствуют материалам МГЭИК 2006 года. В таблице 8 приведены величины коэффициентов теплотворных способностей и коэффициентов выбросов CO₂ для наиболее распространенных видов топлив. В последней колонке таблицы 9 представлены величины коэффициентов выбросов CO₂, выраженные в т CO₂/МВт ч. Напомним, что 1 МВт ч = 3,6 ГДж.

Для остальных видов топлив данные коэффициенты приведены в Пособии по разработке плана действий по устойчивому энергетическому развитию⁴⁵.

В зависимости от состава, низшая теплотворная способность природного газа составляет обычно 0,034–0,036 ГДж/м³.

В том случае, если для топлива неизвестно табличное значение средней низшей теплотворной способности, но известен химический состав топлива, величина коэффициента выбросов CO₂ определяется по уравнениям (24a–24b) раздела 2.

Величина средней массовой доли углерода в иловом осадке по данным МГЭИК 2006⁴⁶ составляет 40 %–50 %. Но по другим литературным данным⁴⁷ эта величина может изменяться от 44 %

⁴⁴ http://www.soglasheniemerov.eu/about/covenant-of-mayors_ru.html

⁴⁵ http://www.eumayors.eu/IMG/pdf/guidebook_part_2_ru_seapcorrection-rus.pdf

⁴⁶ Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006. Том 5. Инсинерация и открытое сжигание отходов. http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/pdf/5_Volume5/V5_5_Ch5_IOB.pdf

до 76 % (по сухому веществу). В цитированной выше работе ФГУП «НИИ Атмосфера»⁴¹ величина средней массовой доли углерода в иловом осадке (пересчитанная по данным таблицы 9) принята равной 75 %. В работе ФГУП «НИИ Атмосфера» выбросы углекислоты вследствие сжигания осадка включаются в расчет углеродного следа, что является методически неверным.

Таблица 9 – Значения средних низших теплотворных способностей и коэффициентов выбросов CO₂ для ряда топлив

Вид топлива	Средняя низшая теплотворная способность ископаемого топлива (ГДж/т)	Коэффициент выбросов CO ₂ для ископаемого топлива (т CO ₂ /ГДж)	Коэффициент выбросов CO ₂ для ископаемого топлива (т CO ₂ /МВт ч)
Сырая нефть	42,3	0,0733	0,264
Сжиженный природный газ	44,2	0,0642	0,231
Автомобильный бензин	44,3	0,0693	0,249
Авиационный бензин	44,3	0,0700	0,252
Авиационный керосин	44,1	0,0715	0,257
Другие виды керосина	43,8	0,0719	0,259
Сланцевое масло	38,1	0,0733	0,264
Дизельное топливо (легкое)	43,0	0,0741	0,267
Топочный мазут	40,4	0,0774	0,279
Сжиженный попутный газ	47,3	0,0631	0,227
Антрацит	26,7	0,0983	0,354
Коксующийся уголь	28,2	0,0946	0,341
Битуминозный (жирный) уголь	25,8	0,0946	0,341
Бурый уголь (лигнит)	11,9	0,1010	0,364
Брикеты из бурого угля	20,7	0,0975	0,351
Брикетируемое топливо	20,7	0,0975	0,351
Кокс	28,2	0,1070	0,385
Природный газ	48,0	0,0561	0,202
Твердые коммунальные отходы (не биомасса)	10	0,143	0,515
Отработанное масло	40,2	0,0733	0,264
Торф	9,76	0,106	0,382
Иловый осадок (сухой) ⁴⁸	25,12	0,1096	0,395

Шаг 2.2. Тепло приобретается у отдельного источника

В том случае, если потребность в тепле удовлетворяется за счет приобретения у отдельного источника (например, котельной или ТЭЦ), расчет выбросов парниковых газов должен включать потери при транспортировке тепла.

В том случае, когда тепло поставляется от котельной, расположенной за пределами производственной площадки, расчет выбросов парниковых газов производится по схеме, представленной в таблице 10.

Коэффициенты выбросов CO₂ для топлива, используемого в котельной (таблица 10, колонка 2), приведены в таблице 9.

Коэффициент потерь тепла в сети (таблица 10, колонка 4) определяется в долях единицы и представляет собой отношение потерь в тепловой сети к величине потребленного тепла. Он

⁴⁷ Седова, Е. А. Эколого-энергетические аспекты использования осадка сточных вод / Е. А. Седова // Научный поиск. Технические науки: материалы третьей науч. конф. аспирантов и докторантов / отв. за вып. С. Д. Ваулин ; Юж.-Урал. гос. ун.-т.- Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2011.- Т. 1.- С. 74-78.- Библиогр.: с. 78 (4 назв.) <http://dspace.susu.ac.ru/bitstream/handle/0001.74/1199/20.pdf?sequence=1>

⁴⁸ «Инвентаризация выбросов парниковых газов на ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», ФГУП «НИИ Атмосфера», Санкт-Петербург, 2007 год

зависит от многих факторов, в том числе таких, как региональные особенности климата, расстояние котельной от потребителя, конструктивные особенности трассы теплоснабжения и др. По данным работы⁴⁹ тепловые потери в тепловых сетях в России могут достигать 40 %.

Таблица 10 – Расчет выбросов парниковых газов при импорте тепла, произведенного в котельной, расположенной за пределами производственной площадки, при известном КПД котельной и коэффициенте потерь тепла в сети

Величина тепла, импортированного от котельной (ГДж/год)	Коэффициент выбросов CO ₂ для топлива, используемого котельной (т CO ₂ /ГДж)	Коэффициент полезного действия котельной (в долях единицы)	Коэффициент потерь тепла в сети (в долях единицы)	Выбросы парниковых газов при импорте тепла от котельной (т CO ₂ /год)
1	2	3	4	5
A	B	C	D	A*B*(D+1)/C

Для наших целей приемлемым приближением при определении коэффициента потерь тепла в сети является его расчет с использованием измеренной величины температуры теплоносителя на тепловом узле производственной площадки (T_{site}) и температуры теплоносителя на выходе из котельной (T_{boiler}). Коэффициент потерь тепла в сети δ_{net} в этом случае определяется как:

$$\delta_{net} = \frac{T_{boiler} - T_{site}}{T_{site}}, \text{ где температура измеряется в кельвинах.}$$

Напомним, что температура в кельвинах (T) и температура в градусах Цельсия ($t^{\circ}C$) связаны соотношением $T = t^{\circ}C + 273,15$.

В этом случае, для расчетов используется таблица 10а.

Таблица 10а – Расчет выбросов парниковых газов при импорте тепла, произведенного в котельной, расположенной за пределами производственной площадки, при известных КПД котельной и температурах теплоносителя на выходе из котельной и на входе на производственную площадку

Величина тепла, приобретенного у котельной (ГДж/год)	Коэффициент выбросов CO ₂ для топлива, используемого котельной (т CO ₂ /ГДж)	Коэффициент полезного действия котельной (в долях единицы)	Температура теплоносителя на выходе из котельной (К)	Температура теплоносителя на входе на производственную площадку (К)	Выбросы парниковых газов при импорте тепла от котельной (т CO ₂ /год)
1	2	3	4	5	6
A	B	C	D	E	A*B*D/C/E

Коэффициент полезного действия котельной (таблицы 10–10а, колонка 3) необходимо запросить у руководства котельной. Подчеркнем, что КПД котельной не следует путать с КПД котла, который может быть очень высоким.

Ориентировочные значения КПД современных котельных приведены в таблице 11⁵⁰.

Таблица 11 – Ориентировочные значения КПД современных котельных

Мощность котельной	Диапазон изменения КПД (в долях единицы)
Менее 100 кВт	0,6–0,80
От 100 до 1000 кВт	0,65–0,90
Более 1000 кВт	0,70–0,90

⁴⁹ Е. Г. Гашо, В. С. Пузаков Современные реалии в сфере теплоснабжения [Электронный ресурс] http://solex-un.ru/sites/solex-un/files/energo_review/konsolidirovannyi_obzor_-_problemy_effektivnogo_teplosnabzheniya--.pdf

⁵⁰ Информационная система по теплоснабжению [Электронный ресурс] http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=416

В том случае, если теплоснабжение осуществляется от ТЭЦ, производящей и тепло, и электроэнергию, расчет выбросов парниковых газов производится по схеме, представленной в таблице 12.

Таблица 12 – Расчет выбросов парниковых газов при импорте тепла, произведенного на ТЭЦ, расположенной за пределами производственной площадки, при известном КПД ТЭЦ по теплу и электроэнергии и коэффициенте потерь тепла в сети

Величина тепла, импортированного от ТЭЦ (ГДж)	Коэффициент выбросов CO ₂ для топлива ТЭЦ (т CO ₂ /ГДж)	КПД ТЭЦ по теплу (в долях единицы)	КПД ТЭЦ по электроэнергии (в долях единицы)
1	2	3	4
A	B	C	D

Количество тепла, произведенное на ТЭЦ в течение года (ГДж)	Количество электроэнергии, произведенное на ТЭЦ в течение года (МВт ч),	Коэффициент потерь тепла в сети (в долях единицы)	Выбросы парниковых газов при импорте тепла, произведенного на ТЭЦ (т CO ₂)
5	6	7	8
E	F	G	$A*B*(1/C+F/(3,6*E*D))*(G+1)$

Для расчетов по таблице 12 необходимо запросить у менеджмента ТЭЦ величины КПД по тепловой и электрической энергии. Эти цифры должны быть известны. В том случае, если коэффициент потерь тепла в сети неизвестен, расчеты проводятся в таблице 12а, где потери тепла определяются по падению температур теплоносителя.

Таблица 12а – Расчет выбросов парниковых газов при покупке тепла, генерированного ТЭЦ, расположенной за пределами производственной площадки, известном КПД ТЭЦ по теплу и электроэнергии и известных температурах теплоносителя на выходе из ТЭЦ и на входе на производственную площадку

Величина тепла, полученного от ТЭЦ (ГДж)	Коэффициент выбросов CO ₂ для топлива ТЭЦ (т CO ₂ /ГДж)	КПД ТЭЦ по теплу (в долях единицы)	КПД ТЭЦ по электроэнергии (в долях единицы)
1	2	3	4
A	B	C	D

Количество тепла, произведенное на ТЭЦ в течение года (ГДж)	Количество электроэнергии, произведенное на ТЭЦ в течение года (МВт ч),	Температура теплоносителя на выходе из ТЭЦ (К)	Температура теплоносителя на входе на производственную площадку (К)	Выбросы парниковых газов при использовании тепла, произведенного на ТЭЦ (т CO ₂)
5	6	7	?	8
E	F	G	I	$A*B*(1/C+F/(3,6*E*D))*G/I$

Если для производства тепла используется несколько видов топлива, то расчеты по схемам таблиц 10, 10а и 12, 12а проводятся столько раз, сколько видов топлива используется в течение года. Затем результаты в последних колонках таблиц суммируются.

Шаг 3. Углеродный след, обусловленный использованием автомобильного транспорта

Использование автомобильного транспорта на сооружениях очистки сточных вод, главным образом, связано с транспортировкой илового осадка. Наибольшее воздействие вклад в парниковый эффект, в данном случае, оказывают выбросы углекислого газа, которые определяются по схеме, представленной в Таблице 13.

Таблица 13 – Расчет выбросов парниковых газов при транспортировке илового осадка однотипным транспортным средством

Число поездок однотипного транспортного средства в течение года	Среднее расстояние перевозки илового осадка одним транспортным средством (км)	Среднее удельное потребление топлива транспортным средством (т или м ³ /км)	Средняя низшая теплотворная способность топлива (ГДж/т или м ³)	Коэффициент выбросов CO ₂ для автомобильного топлива (т CO ₂ /ГДж)	Выбросы парниковых газов при транспортировке илового осадка (т CO ₂)
1	2	3	4	5	6
A	B	C	D	E	A*B*C*D*E

В том случае, если весь иловый осадок транспортируется однотипными транспортными средствами, число поездок (A) определяется делением всей массы осадка, произведенного на площадке и предназначенного к вывозу в течение года на грузоподъемность транспортного средства. В том случае, если используются транспортные средства разной грузоподъемности и работающие на разном топливе, для определения углеродного следа необходимо вести раздельный учет поездок транспортных средств каждого типа. Тогда расчеты по таблице 13 проводятся для каждого транспортного средства и вида топлива, а затем результаты, полученные в столбцах 6, суммируются.

Величина удельного потребления топлива (таблица 13, столбец 3) определяется по паспорту транспортного средства или экспериментально. Последнее является более точным для целей определения углеродного следа.

Значения средней низшей теплотворной способности автомобильного топлива (столбец 4) и коэффициента выбросов CO₂ (столбец 5) приведены в таблице 8.

Углеродный след будет определен более точно, если учитываются все автотранспортные перевозки. Сюда могут быть включены автомобильные перевозки используемых на КОС реагентов, перевозки служебным автотранспортом сотрудников предприятия. Для этой цели необходимо вести на предприятии учет потребленного автомобильного топлива отдельно по каждой категории топлива. Схема расчета выглядит следующим образом (см. Таблицу 14).

Таблица 14 – Расчет выбросов парниковых газов от использования автомобильного транспорта на предприятии

Использованное в течение года автомобильное топливо одного типа (т или м ³)	Средняя низшая теплотворная способность топлива (ГДж/т или м ³)	Коэффициент выбросов CO ₂ для автомобильного топлива (т CO ₂ /ГДж)	Выбросы парниковых газов от использования автомобильного транспорта (т CO ₂)
1	2	3	4
A	B	C	A*B*C

Расчет по таблице 14 производится для каждого вида топлива, а затем результаты, полученные в столбцах 4, суммируются.

Шаг 4. Углеродный след, обусловленный выбросами метана при очистке сточных вод

Выбросы метана при очистке сточных вод происходят на тех участках очистных сооружений, где создаются анаэробные условия. Такими участками могут быть глубокие первичные отстойники и анаэробные зоны в аэротенках.

В аэротенках метан генерируется только в тех случаях, когда очистные сооружения перегружены, либо когда процесс очистки плохо управляется. В подобных условиях может происходить загнивание ила с выделением метана.

Кроме того, в очищенной сточной воде, которая поступает в принимающий водный объект, в остаточных количествах содержатся органические вещества. Эти вещества могут, в зависимости от свойств принимающего водного объекта, подвергаться анаэробному загниванию с выделением метана. Этот компонент углеродного следа будем относить «на счет» КОС в том случае, если сточные воды не были очищены до нормативных значений и сброшены в водные объекты.

Величиной, определяющей выбросы метана в принимаемой методологии МГЭИК, является изменение содержания органических веществ в сточной воде. Иными словами изменение химического потребления кислорода ΔХПК или биологического потребления кислорода ΔБПК в пределах рассматриваемой зоны водного объекта.

Шаг 4.1. Первичные отстойники

Выбросы метана в анаэробной зоне (для наших условий будем полагать, что это первичные отстойники) рассчитываются с использованием уравнения 3 раздела 2.1. Для проведения расчетов следует определить коэффициент конверсии для метана, показывающий часть органического вещества (в долях единицы), которая будет преобразована в метан. Коэффициент зависит, в том числе, от конструкции очистных сооружений. Рекомендации МГЭИК для упрощенного варианта расчетов следующие:

Таблица 15 – Значения коэффициента конверсии метана (упрощенный вариант)

Конструкция анаэробной зоны	Коэффициент конверсии
Мелкий анаэробный отстойник (глубина менее 2 метров)	0,2
Глубокий анаэробный отстойник (глубина более 2 метров)	0,8

Таблица 15а – Расчет выбросов метана при очистке сточных вод в анаэробных условиях (упрощенный вариант)

Изменение величины концентрации ХПК в зоне анаэробной очистки за год (т/м ³)	Объем сточных вод проходящих через зону анаэробной очистки за год (м ³)	Выбросы метана при очистке сточных вод в анаэробных условиях (т CO ₂ -экв.)	
		При глубине анаэробного отстойника менее 2 м	При глубине анаэробного отстойника более 2 м
1	2	3.1	3.2
A	B	25*0,25*0,2*A*B	25*0,25*0,8*A*B

Более точно величину коэффициента конверсии метана можно определить, учитывая среднюю температуру сточной воды в анаэробной зоне, поскольку активность метаногенных бактерий зависит от температуры и «степень анаэробности», которая зависит от глубины отстойника. Таким образом, коэффициент конверсии метана можно представить в виде произведения: $C = C_T * C_d$, где C_T — температурный фактор конверсии метана, а C_d — фактор, зависящий от глубины отстойника.

Расчет температурного фактора конверсии метана проводится в столбцах (4-5) таблицы 16, используя уравнения (5–6) раздела 2.

Методология МГЭИК для учета фактора глубины отстойника рекомендует: при глубине отстойника более 5 м величина C_d принимается равной 0,7, при глубине от 1 до 5 м — $C_d = 0,5$, при глубине менее 1 м — $C_d = 0$. Однако, учитывая приведенные в разделе 2.3, уточненные экспериментальные значения, мы рекомендуем для глубоких отстойников взять величину $C_d = 0,9$, для «промежуточной» глубины — $C_d = 0,6$, а для мелких отстойников — $C_d = 0,02$. Эти величины приведены в столбце 7 таблицы 16.

Максимальный удельный выход метана при распаде органических соединений (по ХПК) в сточной воде — численное значение максимального количества метана, которое будет образовано при заданном уменьшении ХПК. Теоретические выкладки (раздел 2.1.1) и данные экспериментов (раздел 2.3) свидетельствуют о том, что в качестве этого параметра может быть принято соотношение, равное 0,25 т CH_4 /т ХПК (столбец 9, таблица 16).

Теперь расчет выбросов метана можно провести в таблице 16, используя уравнение (3) раздела 2.1.1.

Таблица 16 – Расчет выбросов метана при очистке сточных вод в анаэробных условиях (первичный отстойник)

	Месяц	Среднее значение изменения величины ХПК на входе и выходе первичного отстойника в течение месяца (т/м ³)	Объем сточных вод проходящих через первичный отстойник за месяц (м ³)	Средняя температура сточной воды в первичном отстойнике (К)
	1	2	3	4
		ΔXPK_i	Q_i	T_i
1	январь	ΔXPK_1	Q_1	T_1
2	февраль	ΔXPK_2	Q_2	T_2
3	март	ΔXPK_3	Q_3	T_3
4	апрель	ΔXPK_4	Q_4	T_4
5	май	ΔXPK_5	Q_5	T_5
6	июнь	ΔXPK_6	Q_6	T_6
7	июль	ΔXPK_7	Q_7	T_7
8	август	ΔXPK_8	Q_8	T_8
9	сентябрь	ΔXPK_9	Q_9	T_9
10	октябрь	ΔXPK_{10}	Q_{10}	T_{10}
11	ноябрь	ΔXPK_{11}	Q_{11}	T_{11}
12	декабрь	ΔXPK_{12}	Q_{12}	T_{12}

Таблица 16 (продолжение 1) – Расчет выбросов метана при очистке сточных вод в анаэробных условиях (первичный отстойник)

Месяц	Среднемесячный температурный фактор конверсии метана $C_{i,T}$			Коэффициент конверсии метана в зависимости от глубины первичного отстойника		
	$T_i < 283 K$	$283K < T_i < 303,16 K$	$T_i > 303,16 K$	При глубине отстойника более 5 м	При глубине отстойника от 1 до 5 м	При глубине отстойника менее 1 м
5	6			7		
январь	0	$C_1 = \text{Exp}[(T_1-303,16)/T_1]$	1	0,9	0,6	0,02
февраль	0	$C_2 = \text{Exp}[(T_2-303,16)/T_2]$	1	0,9	0,6	0,02
март	0	$C_3 = \text{Exp}[(T_3-303,16)/T_3]$	1	0,9	0,6	0,02
апрель	0	$C_4 = \text{Exp}[(T_4-303,16)/T_4]$	1	0,9	0,6	0,02
май	0	$C_5 = \text{Exp}[(T_5-303,16)/T_5]$	1	0,9	0,6	0,02
июнь	0	$C_6 = \text{Exp}[(T_6-303,16)/T_6]$	1	0,9	0,6	0,02
июль	0	$C_7 = \text{Exp}[(T_7-303,16)/T_7]$	1	0,9	0,6	0,02
август	0	$C_8 = \text{Exp}[(T_8-303,16)/T_8]$	1	0,9	0,6	0,02
сентябрь	0	$C_9 = \text{Exp}[(T_9-303,16)/T_9]$	1	0,9	0,6	0,02
октябрь	0	$C_{10} = \text{Exp}[(T_{10}-303,16)/T_{10}]$	1	0,9	0,6	0,02
ноябрь	0	$C_{11} = \text{Exp}[(T_{11}-303,16)/T_{11}]$	1	0,9	0,6	0,02
декабрь	0	$C_{12} = \text{Exp}[(T_{12}-303,16)/T_{12}]$	1	0,9	0,6	0,02

Таблица 16 (продолжение 2) – Расчет выбросов метана при очистке сточных вод в анаэробных условиях (первичный отстойник)

	Месяц	Максимальный удельный выход метана в сточной воде (т СН ₄ /т ХПК)	Потенциал глобально-го потепления для метана	Выбросы метана при очистке сточных вод в анаэробных условиях (т СО ₂ -экв.)
	8	9	10	11
1	январь	0,25	25	(2)*(3)*(6)*(7)*(9)*(10)
2	февраль	0,25	25	(2)*(3)*(6)*(7)*(9)*(10)
3	март	0,25	25	(2)*(3)*(6)*(7)*(9)*(10)
4	апрель	0,25	25	(2)*(3)*(6)*(7)*(9)*(10)
5	май	0,25	25	(2)*(3)*(6)*(7)*(9)*(10)
6	июнь	0,25	25	(2)*(3)*(6)*(7)*(9)*(10)
7	июль	0,25	25	(2)*(3)*(6)*(7)*(9)*(10)
8	август	0,25	25	(2)*(3)*(6)*(7)*(9)*(10)
9	сентябрь	0,25	25	(2)*(3)*(6)*(7)*(9)*(10)
10	октябрь	0,25	25	(2)*(3)*(6)*(7)*(9)*(10)
11	ноябрь	0,25	25	(2)*(3)*(6)*(7)*(9)*(10)
12	декабрь	0,25	25	(2)*(3)*(6)*(7)*(9)*(10)
	Итого за год			Сумма строк с 1 по 12

Шаг 4.2. Аэробная очистка

Выбросы метана в аэробных зонах зависят от стабильности работы очистных сооружений. Если колебания нагрузки на сооружения происходят ежедневно, то методология МГЭИК рекомендует производить ежедневные измерения величин ХПК на входе и выходе из аэробных зон (уравнение 13). Если очистные сооружения работают стабильно, можно даже ограничиться подекадными измерениями или ежемесячными. Приведем расчетную схему для подекадных измерений.

В качестве параметра, определяющего перегрузку очистных сооружений, используется величина эффективности очистки по ХПК, — соотношение между количествами органического вещества, окисленного в аэробной зоне и поступившего в аэробную зону в течение декады (уравнение 14).

Далее расчет выбросов метана осуществляется по схеме, приведенной в таблице 17.

Таблица 17 – Расчет выбросов метана при очистке сточных вод при очистке сточных вод в аэробных условиях

Средняя за декаду величина ХПК на входе в аэробную зону (т/м ³)	Средняя за декаду величина ХПК на выходе из аэробной зоны (т/м ³)	Эффективность очистки по ХПК	Выбор пути дальнейшего расчета	Выбросы метана при очистке сточных вод в аэробных условиях (т СО ₂ -экв.)
1	2	3	4	5
A	B	(A-B)/A	Если (3) ≥ 0,8, то переход к столбцу (5); Если (3) < 0,8, то переход к столбцам (6-11)	0

Таблица 17 (продолжение) – Расчет выбросов метана при очистке сточных вод в аэробных условиях

Декада, когда выполняется условие (3) < 0,8	Объем сточных вод, проходящих через зону аэробной очистки в декаду (м ³)	Изменение концентраций ХПК в аэробной зоне (т/м ³)	Максимальный удельный выход метана в сточной воде (т СН ₄ /т ХПК)	Коэффициент конверсии метана	Потенциал глобального потепления для метана	Выбросы метана при очистке сточных вод в аэробных условиях (т СО ₂ -экв.)
6	7	8	9	10	11	12
Декада 1	Q ₁	$\Delta\text{ХПК}_1 = (1)_1 - (2)_1$	0,25	0,4	25	$(7) \cdot (8) \cdot (9) \cdot (10) \cdot (11)$
Декада 2	Q ₂	$\Delta\text{ХПК}_2 = (1)_2 - (2)_2$	0,25	0,4	25	$(7) \cdot (8) \cdot (9) \cdot (10) \cdot (11)$
Декада n	Q _n	$\Delta\text{ХПК}_n = (1)_n - (2)_n$	0,25	0,4	25	$(7) \cdot (8) \cdot (9) \cdot (10) \cdot (11)$
Итого за год						Сумма по всем декадам

Шаг 4.3. Упрощенный вариант расчета выбросов метана при очистке сточных вод на биологических очистных сооружениях

В том случае, если данные по изменению ХПК после первичных отстойников отсутствуют, выбросы метана, вызванные процессом очистки сточных вод, можно определить по упрощенной схеме. Расчеты выполняются по схеме таблицы 17а.

Таблица 17а – Расчет выбросов метана при биологической очистке сточных вод (упрощенный вариант)

Изменение величины концентрации ХПК в процессе очистки за год (т/м ³)	Объем сточных вод проходящих через зону аэробной очистки за год (м ³)	Среднегодовой коэффициент конверсии метана			Выбросы метана при биологической очистке (т СО ₂ -экв.)
		Нормально работающие очистные сооружения	Очистные сооружения с незначительной перегрузкой	Очистные сооружения со значительной перегрузкой	
1	2	3			4
A	B	0*	0,2	0,4	$25 \cdot 0,25 \cdot A \cdot B \cdot (3)$

* – в методологии МГЭИК-2006 диапазон изменения коэффициента для аэробных очистных сооружений составляет 0–0,1. Однако эксперты МГЭИК считают, что для хорошо работающих очистных сооружений выбросы метана незначительны; коэффициент следует принимать равным нулю. Ориентиром при выборе оценки «хорошо» или «плохо» может служить величина коэффициента окисления, определенная по величинам ХПК на входе и выходе с очистных сооружений (см. Шаг 4.2)

Шаг 5. Углеродный след, обусловленный выбросами парниковых газов при утилизации осадка сточных вод

Осадок сточных вод может утилизироваться разными способами: размещаться на полигоне, сжигаться, использоваться для производства биогаза в метантенках.

Шаг 5.1. Сжигание илового осадка

Для сжигаемого илового осадка расчет выбросов парниковых газов не производится. Полученная от сжигания осадка тепловая или электрическая энергия вычитается из общих энергетических потребностей предприятия КОС.

Шаг 5.2. Размещение осадка на полигоне или иловой площадке

Определяющим параметром в данном случае является коэффициент конверсии метана, зависящий от конструкции полигона, на котором размещается осадок. Рекомендации МГЭИК приведены в таблице 18.

Таблица 18 – Значения величины коэффициента конверсии метана в зависимости от условий размещения илового осадка

Место размещения илового осадка	Коэффициент конверсии метана
1	2
<u>Анаэробные контролируемые полигоны для размещения твердых отходов.</u> В данном случае существенным является контролируемое размещение осадка на полигоне с регулированием вымывания и пожаров. Такой полигон должен обладать одним из следующих признаков: покрытие грунтом или иным инертным материалом, механическое уплотнение, выравнивание отходов.	1,0
<u>Полу-анаэробные контролируемые полигоны для размещения твердых отходов.</u> Это также контролируемое размещение осадка на полигоне. Такой полигон должен обладать одним из следующих признаков: покрытие проницаемым материалом, система дренажа фильтрата, регулируемая вместимость, система вентиляции свалочных газов.	0,5
<u>Неконтролируемые полигоны для размещения твердых отходов (глубокие и/или с высоким уровнем грунтовых вод).</u> Это относится к таким полигонам, которые не отвечают приведенным выше критериям контролируемых полигонов и имеют глубину более 5 м и/или высокий уровень грунтовых вод. Например, это относится к случаям, когда отходами заполняют обводненный карьер, пруд или болото.	0,8
<u>Неконтролируемые полигоны для размещения твердых отходов.</u> Это относится ко всем остальным полигонам, которые не отвечают приведенным выше критериям контролируемых полигонов и имеют глубину менее 5 м. К этой категории относятся также иловые площадки с естественным и искусственным основанием.	0,4
<u>Неглубокие полигоны для размещения твердых отходов.</u> Это относится ко всем полигонам, не попадающим под перечисленные категории.	0,6

После выбора величины коэффициента конверсии метана выбросы метана при размещении осадка на полигоне рассчитываются по схеме, приведенной в таблице 19.

Таблица 19 – Расчет выбросов парниковых газов при размещении илового осадка на полигоне

Масса размещенного илового осадка (по сухому веществу) (т)	Коэффициент конверсии метана (столбец 2 таблицы 18)	Разлагаемая органическая часть сухого осадка (в долях единицы)	Доля разлагаемого органического вещества, превращенного в биогаз	Доля метана в биогазе	Выбросы парниковых газов при размещении илового осадка на полигоне (т CO ₂ -экв.)
1	2	3	4	5	6
A	B	C	D	E	25*A*B*C*D*E*16/12

В столбец 3 подставляется разлагаемая органическая часть сухого осадка (в долях единицы). Рекомендованные МГЭИК значения составляют: 0,5 для илового осадка хозяйственно-бытовых сточных вод и 0,257 для промышленных сточных вод. Для конкретных очистных сооружений эти данные могут быть уточнены.

В столбец 4 подставляется доля разлагаемого органического вещества, превращенного в биогаз. Рекомендованное МГЭИК значение составляет 0,5.

В столбец 5 подставляется доля метана в биогазе. Рекомендованное МГЭИК значение составляет 0,5. Фактически, по данным [15], доля метана в биогазе выше и составляет 0,6–0,75.

Шаг 5.3. Обработка илового осадка в новом метантенке

Выбросы парниковых газов при обработке илового осадка в метантенке рассчитываются по схеме, приведенной в таблице 19. Речь идет об утечках метана из нового метантенка, для которого можно ввести понятие «нормативной утечки». МГЭИК рекомендует величину равную $0,05 \text{ м}^3$ биогаза, уходящего в атмосферу, на 1 м^3 произведенного биогаза. Понятно, что у метантенка, долгое время находившегося в эксплуатации, эта величина будет иной и должна определяться экспериментально.

В случае обработки осадка в метантенке и последующего сжигания биогаза для получения тепловой или электрической энергии возможными источниками метана являются утечки последнего из метантенка и трубопроводов и неполное сгорание метана. Последним фактором обычно пренебрегают. Для утечек метана из метантенка применим уравнение (12b):

Таблица 20 – Расчет выбросов ПГ при обработке илового осадка в новом метантенке

Количество биогаза, собранное на выходе из метантенка в год (м^3)	Доля биогаза, который уходит в атмосферу из метантенка (в долях единицы)	Массовая доля метана в биогазе (в долях единицы)	Выбросы ПГ при обработке илового осадка в новом метантенке (т CO_2 -экв.)
1	2	3	4
A	B	C	$25 \cdot A \cdot B \cdot C \cdot (1,96 - 1,25 \cdot C) \cdot 0,001$

Массовая доля метана в биогазе (столбец 3 таблицы 20) принимается по экспериментальным данным. Если такие данные отсутствуют, рекомендуется для осадка общесплавных очистных сооружений принимать данную величину $C = 0,6$.

Шаг 5.4. Выбросы закиси азота при захоронении сырого осадка в почве или его размещении на полигоне

В том случае, если иловый осадок высушивается при контролируемых аэробных условиях, и затем размещается на полигоне или перерабатывается в новом анаэробном метантенке, обезвоживается, известкуется и хранится до окончательного размещения на полигоне, выбросы закиси азота можно не учитывать в силу их незначительности.

В том случае если сырой осадок вносится в почву или размещается на необорудованном полигоне, выбросы закиси азота (N_2O) рассчитываются по уравнению (18) в таблице 21.

Таблица 21 – Расчет выбросов закиси азота при внесении илового осадка в почву или размещении на необорудованном полигоне

Масса илового осадка захороненного в почву в течение года (т),	Массовая доля азота в иловом осадке (т N/т осадка)	Коэффициент конверсии N_2O при разложении илового осадка (т N_2O /т N)	Потенциал глобального потепления для закиси азота	Выбросы закиси азота при внесении илового осадка в почву или размещении на необорудованном полигоне (т CO_2 -экв.)
1	2	3	4	5
A	B	0,016	298	$298 \cdot 0,016 \cdot A \cdot B$

Величина массовой доли азота в иловом осадке (столбец 2) определяется в результате химического анализа осадка. Величина коэффициента конверсии (столбец 3) принята, исходя из величины конверсии по полному азоту, определяемому по Кьельдалю ($0,01 \text{ т } \text{N}_2\text{O-N/т N}$) по рекомендации МГЭИК (см. раздел 2.1.2), умноженному на $44/28$ — величину, обратную массовой доле азота в N_2O .

Шаг 6. Углеродный след, обусловленный выбросами закиси азота в процессе очистки сточных вод

В методологии МГЭИК компонента углеродного следа, связанная с выбросами закиси азота при очистке сточных вод, не определяется. Для расчета этого компонента воспользуемся уравнением (32) раздела 2.2, а коэффициент конверсии N_2O определим, исходя из экспериментальных данных, приведенных в разделе 2.3, равным $EF_{N_2O/N} = 0,013 \text{ кг } N_2O - N/\Delta N$.

Расчеты производятся по схеме, представленной в таблице 22.

Таблица 22 – Расчет выбросов закиси азота в процессе очистки сточных вод

	Месяц	Концентрация общего азота (по Кьельдалю) в сточной воде, поступающей на очистные сооружения (г/м ³)	Концентрация общего азота (по Кьельдалю) в очищенной сточной воде (г/м ³)	Объем сточных вод проходящих через очистные сооружения за месяц (м ³)	Выбросы закиси азота в процессе очистки сточных вод (т CO ₂ -экв.)
	1	2	3	4	5
		$C_{i,in}$	$C_{i,out}$	Q_i	$(C_{i,in} - C_{i,out}) * Q_i$
1	январь	$C_{1,in}$	$C_{1,out}$	Q_1	$(C_{1,in} - C_{1,out}) * Q_1$
2	февраль	$C_{2,in}$	$C_{2,out}$	Q_2	$(C_{2,in} - C_{2,out}) * Q_2$
3	март	$C_{3,in}$	$C_{3,out}$	Q_3	$(C_{3,in} - C_{3,out}) * Q_3$
4	апрель	$C_{4,in}$	$C_{4,out}$	Q_4	$(C_{4,in} - C_{4,out}) * Q_4$
5	май	$C_{5,in}$	$C_{5,out}$	Q_5	$(C_{5,in} - C_{5,out}) * Q_5$
6	июнь	$C_{6,in}$	$C_{6,out}$	Q_6	$(C_{6,in} - C_{6,out}) * Q_6$
7	июль	$C_{7,in}$	$C_{7,out}$	Q_7	$(C_{7,in} - C_{7,out}) * Q_7$
8	август	$C_{8,in}$	$C_{8,out}$	Q_8	$(C_{8,in} - C_{8,out}) * Q_8$
9	сентябрь	$C_{9,in}$	$C_{9,out}$	Q_9	$(C_{9,in} - C_{9,out}) * Q_9$
10	октябрь	$C_{10,in}$	$C_{10,out}$	Q_{10}	$(C_{10,in} - C_{10,out}) * Q_{10}$
11	ноябрь	$C_{11,in}$	$C_{11,out}$	Q_{11}	$(C_{11,in} - C_{11,out}) * Q_{11}$
12	декабрь	$C_{12,in}$	$C_{12,out}$	Q_{12}	$(C_{12,in} - C_{12,out}) * Q_{12}$
Итого за год = $298 * 0,013 * 44 * 10^{-6} * (\text{Сумма строк с 1 по 12}) / 28$					

Коэффициент конверсии N_2O , нормированный на величину удаленного азота (г N, поступившего в атмосферу, на г удаленного N) по результатам раздела 2.3 принят равным 0,013 г N/г ΔN.

Потенциал глобального потепления для N_2O принят равным 298.

Шаг 7. Углеродный след, обусловленный выбросами метана при попадании в водный объект недостаточно очищенных сточных вод

В том случае, если очистные сооружения сбрасывают в принимающий водный объект недостаточно очищенные по ХПК сточные воды, выбросы метана вследствие попадания в водный объект очищенной сточной воды с остаточным содержанием органических веществ быть отнесены к углеродному следу предприятия КОС. Расчет выбросов метана в данном случае производится с помощью уравнений (15-17) и сводится к схеме таблицы 23, практически идентичной таблице 16.

Методология МГЭИК для учета фактора глубины принимающего водного объекта рекомендует: при глубине водного объекта более 5 м величина C_d принимается равной 0,7, при глубине от 1 до 5 м — $C_d = 0,5$, при глубине менее 1 м — $C_d = 0$. Однако, учитывая приведенные в разделе 2.3, уточненные экспериментальные значения, мы рекомендуем для глубоких водных объектов взять величину $C_d = 0,9$, для «промежуточной» глубины — $C_d = 0,6$, а для мелких водных объектов — $C_d = 0,02$.

Таблица 23 – Расчет выбросов метана при попадании в водный объект недостаточно очищенных сточных вод

	Месяц	Среднемесячное значение величины концентрации ХПК на сбросе в принимающий водный объект (т/м ³)	Нормативное значение величины концентрации ХПК на сбросе очистных сооружений (т/м ³)	Объем сточных вод проходящих через очистные сооружения за месяц (м ³)	Средняя температура воды в принимающем водном объекте (К)
	1	2	3	4	5
		ХПК _i	ХПК _{нормативное}	Q _i	T _i
1	январь	ХПК ₁	ХПК _{нормативное}	Q ₁	T ₁
2	февраль	ХПК ₂	ХПК _{нормативное}	Q ₂	T ₂
3	март	ХПК ₃	ХПК _{нормативное}	Q ₃	T ₃
4	апрель	ХПК ₄	ХПК _{нормативное}	Q ₄	T ₄
5	май	ХПК ₅	ХПК _{нормативное}	Q ₅	T ₅
6	июнь	ХПК ₆	ХПК _{нормативное}	Q ₆	T ₆
7	июль	ХПК ₇	ХПК _{нормативное}	Q ₇	T ₇
8	август	ХПК ₈	ХПК _{нормативное}	Q ₈	T ₈
9	сентябрь	ХПК ₉	ХПК _{нормативное}	Q ₉	T ₉
10	октябрь	ХПК ₁₀	ХПК _{нормативное}	Q ₁₀	T ₁₀
11	ноябрь	ХПК ₁₁	ХПК _{нормативное}	Q ₁₁	T ₁₁
12	декабрь	ХПК ₁₂	ХПК _{нормативное}	Q ₁₂	T ₁₂

Таблица 23 (продолжение 1) – Расчет выбросов метана при попадании в водный объект недостаточно очищенных сточных вод

Месяц	Среднемесячный температурный фактор конверсии метана C _{i,T}			Коэффициент конверсии метана в зависимости от глубины принимающего водного объекта сточных вод		
	6			7		
	T _i <283K	283K<T _i <303,16K	T _i >303,16K	При глубине водного объекта более 5 м	При глубине водного объекта от 1 до 5 м	При глубине водного объекта менее 1 м
январь	0	C ₁ = Exp[(T ₁ -303,16)/T ₁]	1	0,9	0,6	0,02
февраль	0	C ₂ = Exp[(T ₂ -303,16)/T ₂]	1	0,9	0,6	0,02
март	0	C ₃ = Exp[(T ₃ -303,16)/T ₃]	1	0,9	0,6	0,02
апрель	0	C ₄ = Exp[(T ₄ -303,16)/T ₄]	1	0,9	0,6	0,02
май	0	C ₅ = Exp[(T ₅ -303,16)/T ₅]	1	0,9	0,6	0,02
июнь	0	C ₆ = Exp[(T ₆ -303,16)/T ₆]	1	0,9	0,6	0,02
июль	0	C ₇ = Exp[(T ₇ -303,16)/T ₇]	1	0,9	0,6	0,02
август	0	C ₈ = Exp[(T ₈ -303,16)/T ₈]	1	0,9	0,6	0,02
сентябрь	0	C ₉ = Exp[(T ₉ -303,16)/T ₉]	1	0,9	0,6	0,02
октябрь	0	C ₁₀ = Exp[(T ₁₀ -303,16)/T ₁₀]	1	0,9	0,6	0,02
ноябрь	0	C ₁₁ = Exp[(T ₁₁ -303,16)/T ₁₁]	1	0,9	0,6	0,02
декабрь	0	C ₁₂ = Exp[(T ₁₂ -303,16)/T ₁₂]	1	0,9	0,6	0,02

Таблица 23 (продолжение 2) – Расчет выбросов метана при попадании водный объект недостаточно очищенных сточных вод

	Месяц	Выбор пути дальнейшего расчета	Эмиссия метана при попадании в водный объект недостаточно очищенных сточных вод (т CO ₂ -экв.)	
	8	9	10	11
1	январь	Если [(2)-(3)] > 0, то (10); Если [(2)-(3)] ≤ 0, то (11)	6,25*[(2)-(3)]*(6)*(7)	0
2	февраль	Если [(2)-(3)] > 0, то (10); Если [(2)-(3)] ≤ 0, то (11)	6,25*[(2)-(3)]*(6)*(7)	0
3	март	Если [(2)-(3)] > 0, то (10); Если [(2)-(3)] ≤ 0, то (11)	6,25*[(2)-(3)]*(6)*(7)	0
4	апрель	Если [(2)-(3)] > 0, то (10); Если [(2)-(3)] ≤ 0, то (11)	6,25*[(2)-(3)]*(6)*(7)	0
5	май	Если [(2)-(3)] > 0, то (10); Если [(2)-(3)] ≤ 0, то (11)	6,25*[(2)-(3)]*(6)*(7)	0
6	июнь	Если [(2)-(3)] > 0, то (10); Если [(2)-(3)] ≤ 0, то (11)	6,25*[(2)-(3)]*(6)*(7)	0
7	июль	Если [(2)-(3)] > 0, то (10); Если [(2)-(3)] ≤ 0, то (11)	6,25*[(2)-(3)]*(6)*(7)	0
8	август	Если [(2)-(3)] > 0, то (10); Если [(2)-(3)] ≤ 0, то (11)	6,25*[(2)-(3)]*(6)*(7)	0
9	сентябрь	Если [(2)-(3)] > 0, то (10); Если [(2)-(3)] ≤ 0, то (11)	6,25*[(2)-(3)]*(6)*(7)	0
10	октябрь	Если [(2)-(3)] > 0, то (10); Если [(2)-(3)] ≤ 0, то (11)	6,25*[(2)-(3)]*(6)*(7)	0
11	ноябрь	Если [(2)-(3)] > 0, то (10); Если [(2)-(3)] ≤ 0, то (11)	6,25*[(2)-(3)]*(6)*(7)	0
12	декабрь	Если [(2)-(3)] > 0, то (10); Если [(2)-(3)] ≤ 0, то (11)	6,25*[(2)-(3)]*(6)*(7)	0
	Итого за год		Сумма строк с 1 по 12	

По окончании пошагового расчета компонентов углеродного следа они суммируются с учетом того, какие способы очистки сточных вод и утилизации илового осадка применяются на конкретном предприятии КОС.

Шаг 8. Углеродный след, обусловленный использованием реагентов и расходных материалов при очистке сточных вод

Процесс очистки сточных вод, как правило, сопровождается использованием различного рода химических реагентов и расходных материалов. Среди них наиболее часто используются следующие: метанол, известь, песок, полимеры, сульфаты железа и алюминия.

Каждое из этих веществ было произведено с определенными энергетическими затратами и, затем, транспортировано от места производства на предприятие КОС.

Как уже указывалось выше, возможны два подхода к учету данной компоненты углеродного следа. Подход первый заключается в полной оценке углеродного следа продукта, включая углеродный след производства и углеродный след транспортировки и включения суммарного следа в углеродный след предприятия КОС. При втором подходе «в зачет» предприятия КОС идет только углеродный след транспортировки продукта. При этом предполагается, что углеродный след производства химических реагентов уже был включен в общий углеродный след региона, где продукт был произведен.

Мы рекомендуем использовать второй подход, и выбирать поставщиков реагентов и расходных материалов не только ориентируясь на предлагаемую цену, но и на расстояние и способ

транспортировки. Для выбора и оценки углеродного следа транспортного средства можно воспользоваться одним из калькуляторов углеродного следа. В частности, хороший калькулятор с многоязычным (включая русский) интерфейсом расположен по адресу <http://calculator.carbonfootprint.com/calculator.aspx>

Но при проведении сравнений различных предприятий КОС по величине углеродного следа следует знать, какие компоненты УС включены в расчет. В том случае, если УС производства реагентов учитываются при проведении бенчмаркинга, нужно, по меньшей мере, знать, велика ли это доля в общем углеродном следе. Кроме того, если при выборе реагентов имеются альтернативы, то будет полезным сравнить различные вещества и по величине углеродного следа.

Приведем (по зарубежным данным) величины энергетических затрат и углеродного следа ряда реагентов, используемых при очистке сточных вод.

Известь. По данным, приведенным в Справочном документе по наилучшим доступным технологиям (НДТ) производства цемента, оксида магния и извести⁵¹, а также в Четвертом отчете по оценке изменения климата 2007 года⁵², энергопотребление при производстве извести составляет в Европе от 3,6 до 7,7 ГДж на тонну продукции, а в Канаде — 7,2 ГДж/т. При этом, связанные с энергетикой выбросы парниковых газов составляют от 0,2 до 0,4 т CO₂-экв./т извести. Выбросы парниковых газов, связанные с химическим процессом производства извести в Европе составляют 0,8 т CO₂-экв./т извести. Суммируя эти величины, получаем для Европы величину углеродного следа равной 1,0 – 1,2 т CO₂-экв./т извести.

Метанол. По данным Института метанола (США)⁵³, углеродный след производства метанола на заводах, построенных в начале 2000-х годов, составлял 0,9–1,0 т CO₂-экв./т метанола. На современных заводах эту величину удалось сократить до 0,54 т CO₂-экв./т метанола.

Сульфат алюминия. По приведенным в статье⁵⁴ данным величина углеродного следа сульфата алюминия незначительна и составляет, включая добычу бокситов, 0,12–0,15 т CO₂-экв./т сульфата алюминия.

⁵¹ Справочный документ по наилучшим доступным технологиям производства цемента, оксида магния и извести. 2009 год (русский перевод) http://14000.ru/brefs/BREF_Cement.pdf

⁵² Climate Change 2007: Working Group III: Mitigation of Climate Change. 7.4.5.2 Lime [Электронный ресурс] http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/ch7s7-4-5-2.html

⁵³ Improving Methanol Production Efficiency and Reducing Carbon Dioxide Emissions [Электронный ресурс] <http://www.methanol.org/Methanol-Basics/Resources/Improving-Methanol-Production-Efficiency.aspx>

⁵⁴ Coats, Erik R. Watkins, David L., Kranenburg, Dan. A Comparative Environmental Life-Cycle Analysis for Removing Phosphorus from Wastewater: Biological versus Physical/Chemical Processes // Water Environment Research, 2011. Vol. 83. # 8. P. 750-760. <http://www.webs1.uidaho.edu/eecoats/Coats-WER-2011b.pdf>

4. Мониторинг параметров, необходимых для расчета углеродного следа очистных сооружений

Для ежегодного определения величины углеродного следа необходимо в течение года собирать информацию о тех аспектах деятельности предприятия, которые влияют на величину углеродного следа. В этом разделе идентифицируются параметры, необходимые для расчета углеродного следа КОС и указывается частота их определения.

4.1 Энергетика

4.1.1. Потребление приобретаемой предприятием электроэнергии (МВт час/год). Эта величина измеряется непрерывно и может быть определена суммированием показаний счетчиков электрической энергии по предприятию или показанием единственного счетчика на входе, если таковой существует. Используется в расчетной таблице 6.

4.1.2. Потребление ископаемого топлива или отходов для получения тепловой или электрической энергии на производственной площадке (тонны или м³). Учитывается по накладным или иным документам учета потребления топлива или отходов для каждого вида топлива или отходов отдельно. В качестве отходов может рассматриваться, в частности, и иловый осадок, если технология предусматривает его сжигание. Используется в расчетной таблице 8.

4.1.3. Потребление предприятием тепла, приобретенного у котельной, расположенной за пределами производственной площадки (ГДж/год). Предполагается, что данная котельная является «внешней», т.е. не входящей в состав предприятия КОС в качестве структурной единицы. В противном случае, см. 4.1.2. Используется в таблицах 10, 10а.

Определяется по счетчику полученной тепловой энергии за год. Для расчета также используется среднее значение КПД котельной (запрашивается и менеджмента котельной) и коэффициент потери тепла в распределительной сети от котельной до промышленной площадки. Если последняя величина менеджменту котельной неизвестна, то необходимо запросить величину среднегодовой (либо осредненной в течение отопительного сезона) температуры теплоносителя в кельвинах. Температура теплоносителя на входе на производственную площадку (К) должна измеряться непрерывно, а затем усредняться за год, иди за продолжительность отопительного сезона.

4.1.4. Потребление предприятием тепла, приобретенного у ТЭЦ, расположенной за пределами производственной площадки (ГДж/год). Используется в таблицах 12, 12а.

Определяется по счетчику полученной тепловой энергии за год. Для расчета также используется среднее значение КПД ТЭЦ по теплу и электроэнергии (запрашивается и менеджмента ТЭЦ) и коэффициент потери тепла в распределительной сети от ТЭЦ до производственной площадки. Если последняя величина менеджменту ТЭЦ неизвестна, то необходимо запросить величину среднегодовой (либо осредненной в течение отопительного сезона) температуры теплоносителя в кельвинах. Температура теплоносителя на входе на производственную площадку (К) должна измеряться непрерывно, а затем усредняться за год, иди за продолжительность отопительного сезона.

4.2 Транспорт

4.2.1 Мониторингу подлежит количество различных видов топлива, израсходованного для производственных целей (т или м³ в год). В случае предприятий КОС транспорт, главным образом, используется для транспортировки илового осадка. Но для корректного учета углеродного следа должны быть учтены все транспортные услуги: перевозка различных расходных материалов, включая реагенты для очистки сточных вод, вывоз отходов, служебные пассажирские перевозки. Расчеты производятся в таблице 14.

В том случае, если учет использованного топлива, по каким-то причинам, произвести сложно, часть углеродного следа, связанную с транспортировкой илового осадка, следует рассчитывать по таблице 13. В этом случае мониторингу подлежат масса вывезенного за год осадка (т/год) и грузоподъемность и тип транспортных средств, использованных для данной цели.

4.3 Процесс очистки сточных вод

4.3.1. Выбросы метана в процессе очистки сточных вод. Считаем, что условия для образования метана могут сложиться в первичном отстойнике. Мониторингу подлежат величины ХПК (т/м^3) на границах зон и на «входе» очистных сооружений и «выходе» из первичных отстойников и «выходе» из очистных сооружений в целом. Оптимальными являются подекадные измерения, которые затем могут быть усреднены за месяц и за год. Также мониторингу подлежат расход сточных вод (м^3) и температура сточных вод (К) в первичном отстойнике и аэротенке.

В том случае, если очистные сооружения работают устойчиво, в расчет включаются величины, осредненные за месяц (таблицы 17 с продолжением). Для неустойчиво работающих сооружений при ежедневно изменяющейся нагрузке в расчетах используются подекадные значения параметров (таблицы 17 с продолжением). В том случае, если расчет производится по упрощенной схеме, достаточно иметь значения параметров осредненные за год (таблицы 18а и 17а).

4.3.2. Выбросы закиси азота в процессе очистки сточных вод. Мониторингу подлежат величины концентраций общего азота (по Кьельдалю) (т/м^3) на «входе» и «выходе» очистных сооружений в целом. Оптимальными являются подекадные измерения, которые затем могут быть осреднены за месяц. Также мониторингу подлежат расход сточных вод (м^3) в месяц.

4.4 Утилизация илового осадка

4.4.1. Для определения выбросов метана и закиси азота при различных способах утилизации осадка мониторингу подлежат:

- ✓ общее количество илового осадка, полученного как отход на очистных сооружениях (по сухому веществу) (т/год);
- ✓ количество илового осадка размещенного на полигоне или внесенного в почву (т/год);
- ✓ количество илового осадка, подвергнутого обработке в метантенках (т/год);
- ✓ количество илового осадка, подвергнутого сжиганию (т/год);
- ✓ количество илового осадка, утилизированного иным образом.

Кроме того, необходимо иметь аналитические данные (средние за год):

- ✓ доля разлагаемой органической части сухого осадка;
- ✓ доля разлагаемого органического вещества, превращенного в биогаз;
- ✓ доля метана в биогазе;
- ✓ массовая доля азота в иловом осадке (т N/т осадка).

При обработке осадка в метантенке мониторингу подлежат:

- ✓ Количество биогаза, собранное на выходе из метантенка в год (м^3),
- ✓ Доля биогаза, который уходит в атмосферу из метантенка.

В том случае, если какие-то из перечисленных величин не измеряются, можно воспользоваться значениями параметров, приведенными в разделе «Шаг 5».

5. Заключение. Рекомендации.

Разработанная методика определения углеродного следа очистных сооружений соответствует новым рекомендациям МГЭИК, содержит существенные уточнения в части определения специфических для предприятий КОС выбросов метана и закиси азота в процессе очистки сточных вод и утилизации илового осадка.

Методика доведена до расчетных таблиц и сопровождается кратким разделом по мониторингу, где содержится информация о необходимом наборе регистрируемых параметров, необходимых для расчета углеродного следа.

Поскольку в значительной степени величина углеродного следа сооружений очистки сточных вод определяется энергетическими затратами, обычные меры энергосбережения будут достаточно эффективны. Однако главное в этом процессе – уменьшение количества обрабатываемой сточной воды. Это необходимо делать путем снижения водопотребления в домохозяйствах и на производстве. Наряду с образовательными и просветительскими мерами хорошо будут действовать и такие меры как нормативное регулирование, касающееся учета потребляемой воды, и повышение тарифов на водопроводную и техническую воду.

Поскольку процесс очистки сточных вод и утилизации осадка очистных сооружений сопровождается выделением метана и закиси азота, можно дать ряд рекомендаций по снижению выбросов этих веществ.

Сжигание илового осадка, несомненно, в плане уменьшения углеродного следа имеет приоритет перед размещением осадка на полигонах. Но более эффективной мерой является сбраживание осадка в метантенках со сбором выделяющегося биогаза, имеющего высокую теплотворную способность (от 21 до 25 МДж/м³). Последующее сжигание этого газа для целей производства тепла и электроэнергии позволит получить некоторое уменьшение величины углеродного следа.

В зонах аэробной очистки метан выделяться не должен. Для этого не следует допускать перегрузки очистных сооружений, образования застойных зон, где может накапливаться и загнивать осадок.

Для предотвращения выделения закиси азота в области аэробной очистки следует контролировать такие параметры как концентрация растворенного в сточной воде кислорода, время гидравлического удержания активного ила, рН, и концентрацию растворенного органического вещества.

В 2012–2013 гг. представленная в настоящем издании методика апробирована при проведении оценки углеродного следа канализационных очистных сооружений ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга». Это предприятие реализует экологическую политику и политику повышения энергоэффективности, применяя на практике меры по сокращению воздействия на окружающую среду и, в том числе, по ограничению выбросов в атмосферу парниковых газов.

Научное издание

Бегак Михаил Владимирович,
Гусева Татьяна Валериановна,
Молчанова Яна Павловна,
Аверочкин Евгений Михайлович
Сагайдук Виктория Леонидовна

**МОНИТОРИНГ И СОКРАЩЕНИЕ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА
РОССИЙСКИХ ВОДОКАНАЛОВ**

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА
СООРУЖЕНИЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД**

Репродуцировано с оригинала авторов

Подписано в печать 11.03.2013 г. Формат 60x84 1/8

Усл. печ. л. 3,62

Уч.-изд. л. 3,55

Тираж 500 экз.

Заказ 12

Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева

Издательский центр

Адрес университета и издательского центра:

125047 г. Москва, Миусская пл., дом 9