



О.В. Харьковина,

*ведущий инженер-технолог по России и СНГ компании General Electric Water & Power,
канд. техн. наук*

С.В. Харькин,

директор компании «Архитектура Водных Технологий» (г. Москва)

ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ОТ АЗОТА И ФОСФОРА: ОЦЕНКА КОРРЕКТНОСТИ ПРЕДЛАГАЕМЫХ ТЕХНИКО-КОММЕРЧЕСКИХ ПРЕДЛОЖЕНИЙ НА СТРОИТЕЛЬСТВО (РЕКОНСТРУКЦИЮ) ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Ужесточение контроля и ответственности муниципальных и промышленных предприятий за негативное воздействие на окружающую среду диктует неизбежность строительства новых (или реконструкции имеющихся) очистных сооружений, которые обеспечили бы требуемое качество очищенных сточных вод. Как выбрать из множества технико-коммерческих предложений (далее — ТКП) наиболее оптимальное? Ответ на этот вопрос ищите в статье.

Реализация современных технологий очистки сточных вод от азота и фосфора при реконструкции (строительстве новых) очистных сооружений и дальнейшая эксплуатация таких очистных сооружений сопряжены с двумя основными проблемами:

1) **недостатки проектных решений:** неверно разработанная технологическая схема для конкретных сточных вод, ошибки в расчетах сооружений биологической очистки сточных вод от азота и фосфора, неоптимальное техническое (конструктивное) исполнение;

2) **неэффективная эксплуатация очистных сооружений,** особенно при запуске их в работу, а также при нештатных и аварийных ситуациях.

При этом ответственными за последствия как первой, так и второй проблемы являются эксплуатационные службы очистных сооружений.



Отметим, что в статье будут рассмотрены основные причины, приводящие к возникновению *первой проблемы*, и даны рекомендации по снижению рисков ее возникновения.

В настоящее время реализация на городских и промышленных очистных сооружениях технологии удаления азота и фосфора является жесткой необходимостью. Причем задача предприятий заключается не в том, чтобы иметь подобные сооружения в принципе, а в том, чтобы построенные (реконструированные) очистные сооружения обеспечивали требуемое для данного предприятия качество очищенной воды.

В этих условиях руководству предприятия (муниципалитета) требуется выбрать из всех поступивших от различных компаний ТКП то решение, которое гарантированно обеспечит заявленные качественные характеристики очищенной воды. При этом предлагаемые решения должны быть еще и экономически целесообразны. Это первый, самый ответственный и, пожалуй, самый рискованный этап внедрения технологии удаления биогенных элементов (при реконструкции уже действующих сооружений или строительстве новых) для собственников, управляющих компаний или руководства очистных сооружений (предприятий).

Канализационные очистные сооружения (далее — КОС) являются частью муниципального хозяйства (городские или поселковые очистные сооружения) или частью предприятий, которые они обслуживают. Современные экономические и экологические условия требуют от очистных сооружений достижения заданных качественных показателей производимого ими продукта (очищенная вода) при минимизации эксплуатационных затрат. Обозначенные задачи могут быть решены только при **комплексном подходе** к реконструкции очистных сооружений.

Как заказчику из десятка предложений с различными технологическими, техническими и конструктивными решениями выбрать то единственное, которое будет стабильно обеспечивать заявленное качество очищенной воды, при этом последующие эксплуатационные затраты не будут превышать затраты, указанные в ТКП? Какие основные ошибки допускают предприятия (муниципалитеты) при выборе оптимального предложения? Рассмотрим детально процедуру принятия решения.

ОЦЕНКА КОРРЕКТНОСТИ ПРЕДЛАГАЕМОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ

Здесь речь пойдет об оценке именно технологического решения, а не его технической реализации¹. То есть технологические решения первичны, и от правильности их выбора и расчетов зависит возможность достижения требуемого качества очищенной воды для конкретных сточных вод.

Для обеспечения качества очищенной воды как на уровне ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения, так и с соблюдением более «мягких» современных требований законодательства к сбросу необходима реализация

¹ Техническая реализация представляет собой конструктивное оформление предлагаемой технологии (например, реализация технологии в типовом решении «аэротенк + вторичный отстойник + система фильтрования», применение мембранного биореактора, использование технологий с загрузкой и т.д.).



в очистных сооружениях процессов **окисления органических соединений, нитрификации, денитрификации и удаления фосфора** (в данном случае мы рассматриваем сточные воды, для очистки которых необходимо использование биологических методов²).

При оценке предлагаемых решений по реализации технологий очистки сточных вод от азота и фосфора необходимо обратить внимание, **на какие качественные показатели сточных вод, поступающих на очистные сооружения, были проведены расчеты.**

Расчет сооружений биологической очистки сточных вод должен проводиться на минимальные и максимальные температуры сточных вод. В соответствии с п. 9.2.5.9 СП 32.13330.2012 «Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85» (далее — СП 32.13330.2012) значения минимальных и максимальных расчетных температур должны быть приняты как среднее за две недели минимальных (максимальных) значений температур. То есть расчет размеров (объема) биологического реактора (азротенка) должен быть проведен на минимальную расчетную температуру (среднюю за две недели минимальных значений температуры сточных вод).

Если за расчетную температуру были приняты более высокие температуры, превышающие минимальные расчетные, то качество очищенной воды при таком подходе (в первую очередь, по аммонийному азоту и азоту нитритов) не будет соответствовать требуемому качеству не только в период времени, когда реальная температура сточных вод будет ниже заложенной в расчет, но и в дополнительный период времени после того, как температура повысится до расчетной. Этот дополнительный период времени равен значению аэробного возраста активного ила.

Например, если период времени, в течение которого температура сточных вод будет ниже температуры, используемой в расчетах ТКП, составляет 30 суток, а расчетное значение аэробного возраста ила — 20 суток, то период времени, когда концентрации аммонийного азота и азота нитритов будут превышать требуемые соответствующие характеристики очищенной воды, составит **50 суток** даже при корректных технологических и технических решениях.

² О биологической очистке сточных вод также см.:

– *Большаков Н.Ю.* Математическое моделирование и внедрение эффективных биотехнологий очистки сточных вод от азота и фосфора на действующих очистных сооружениях канализации // *Справочник эколога.* 2013. № 7. С. 81–89;

– *Харькин С.В.* Канализационные очистные сооружения: вопросы эксплуатации, экономики, реконструкции // *Справочник эколога.* 2013. № 8. С. 87–96 (http://www.profiz.ru/eco/8_2013/ochistka_vody_FBAS/);

– *Куликов Н.И., Куликова Е.Н., Ножевникова А.Н., Приходько Л.Н.* Биотехнология очистки городских сточных вод сообществами прикрепленных микроорганизмов (биоценоз анаммокс) // *Справочник эколога.* 2013. № 9. С. 71–75;

– *Харькин С.В.* Базовые подходы к разработке технологического регламента эксплуатации канализационных очистных сооружений // *Справочник эколога.* 2013. № 10. С. 82–96;

– *Большаков Н.Ю.* Обеспечение эффективного биологического удаления биогенных элементов на городских очистных сооружениях // *Справочник эколога.* 2014. № 11. С. 92–96;

– *Харькина О.В., Харькин С.В.* Проблемы эксплуатации сооружений очистки сточных вод и их решения: вспухание и пенообразование активного ила // *Справочник эколога.* 2015. № 2. С. 85–96 (http://www.profiz.ru/eco/2_2015/stoch_ochistka/) (прим. редакции).



Технологические и технические решения должны быть рассчитаны с учетом количественного и качественного состава конкретных сточных вод (средне-суточный, максимальный суточный, максимальный месячный и максимальный часовой расходы сточных вод).

Необходимо также обратить внимание, **на какие значения качественных показателей сточных вод, поступающих на очистные сооружения, были проведены расчеты** (средние, минимальные, абсолютно максимальные или максимальные с 85%-ной обеспеченностью). Если в качестве расчетных значений были выбраны *средние*, очистные сооружения не смогут обеспечить требуемое качество очистки сточных вод в случае превышения реальных концентраций загрязняющих веществ в поступающей воде над средними значениями. Проводить расчет на *максимальные* значения концентраций, которые могут иметь место 1–2 раза в год, — значит существенно (и необоснованно) увеличивать капитальные затраты.

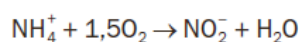
★ НА ЗАМЕТКУ

Наш опыт проектирования и эксплуатации очистных сооружений, работающих по технологиям удаления азота и фосфора, позволяет согласиться с рекомендациями СП 32.13330.2012 о принятии за расчетное значение качественных показателей сточных вод, поступающих на биологическую очистку, максимальных с 85%-ной обеспеченностью.

Схема реализации биологической очистки сточных вод при необходимости удаления азота и фосфора должна обеспечивать оптимальные условия протекания всех биохимических процессов, таких как окисление органических соединений, нитрификация, денитрификация и удаление фосфора (химическое, биологическое или биолого-химическое).

НИТРИФИКАЦИЯ

Процесс нитрификации состоит из двух стадий:



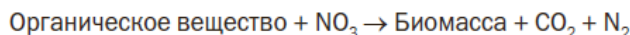
Для реализации процесса нитрификации в ходе очистки сточных вод необходимо обеспечить требуемые:

- время проведения обеих стадий;
- значение аэробного возраста активного ила, которое должно быть не ниже минимального для конкретного типа сточных вод (для минимальной расчетной температуры);
- кислородный режим (концентрация растворенного кислорода не должна быть ниже 1,8–2,0 мг/л);
- значение pH, которое не должно быть вне диапазона рабочих значений (6,5–8,5);
- остаточную щелочность, которая не должна быть ниже 50 мг/л по CaCO₃.



ДЕНИТРИФИКАЦИЯ

Денитрификация представляет собой процесс роста гетеротрофных микроорганизмов при отсутствии растворенного кислорода, когда нитраты используются как акцептор электрона:



Большинство гетеротрофных микроорганизмов в сооружениях биологической очистки сточных вод могут использовать как растворенный кислород, так и связанный кислород нитратов. В связи с тем, что в ходе процесса денитрификации часть органических соединений окисляется связанным кислородом нитратов, требуемое количество растворенного кислорода на окисление оставшейся части органических соединений, поступающих со сточными водами, существенно снижается. Это ведет к уменьшению количества воздуха, подаваемого в аэротенки, и, как следствие, к снижению энергозатрат на аэрацию. Таким образом, требуемый на окисление органических соединений расход воздуха уменьшается за счет того, что часть органических соединений окисляется связанным кислородом нитратов в зоне денитрификации. В зависимости от состава сточных вод экономия электроэнергии на аэрацию в аэротенках составляет 25–45 % при внедрении процесса денитрификации.



К СВЕДЕНИЮ

Реализация процессов нитри-денитрификации, помимо достижения требуемого качества очищенных вод по формам азота, является одним из наиболее эффективных методов сокращения эксплуатационных затрат КОС.

УДАЛЕНИЕ ФОСФОРА

Современные требования к качеству очищенных вод по фосфору неизбежно ведут к необходимости внедрения технологий удаления фосфора из сточных вод. Существует два основных метода, реализация которых позволяет достигать содержания фосфора фосфатов в очищенных сточных водах на уровне 0,2 мг/л, — химический и биологический.



КСТАТИ

Для достижения стабильного качества очищенной воды по P-PO₄ на уровне 0,15 мг/л и ниже мы рекомендуем использовать химический или биолого-химический методы³.

³ Биолого-химический метод является компромиссным, когда основная часть фосфатов удаляется биологическим методом, а дозирование химических реагентов является страховкой недостаточной эффективности процесса биологического удаления фосфора.



Химическое удаление фосфора из сточных вод основано на взаимодействии фосфатов, содержащихся в сточных водах, и солей алюминия или железа, которые добавляют в сточные воды в виде реагентов. В результате образуются соли фосфорной кислоты, которые выпадают в осадок и выводятся из системы.

При реализации технологии химического удаления фосфора важными моментами являются как выбор точки ввода реагента, так и выбор самого реагента. В каждом отдельном случае необходимо отталкиваться от минимизации как эксплуатационных, так и капитальных затрат.

Выбор точки ввода реагента влияет на эффективность удаления 1 мг фосфора на 1 мг реагента, т.е. на количество реагента, необходимого для достижения требуемого качества очищенной воды по фосфору. При этом эффективность различных реагентов вариативна.

С другой стороны, исключение дополнительных сооружений для механического удаления осадка, который образуется вследствие взаимодействия реагентов и фосфора, содержащегося в сточных водах, и ввод реагентов в иловую смесь или возвратный активный ил ведут к увеличению зольности активного ила и, как следствие, к увеличению объемов аноксидных и особенно аэробных зон аэротенков (по причине увеличения прироста активного ила для обеспечения требуемого значения аэробного возраста активного ила следует увеличивать объемы аэробных зон).

Таким образом, оптимально выбранная схема химического удаления фосфора и тип реагента для конкретных сточных вод позволяют стабильно обеспечивать требуемое качество очищенных сточных вод по фосфору при минимальных капитальных и эксплуатационных затратах.

На рисунке 1 приведены некоторые основные и наиболее распространенные на сегодняшний день технологические схемы удаления азота и фосфора из сточных вод.

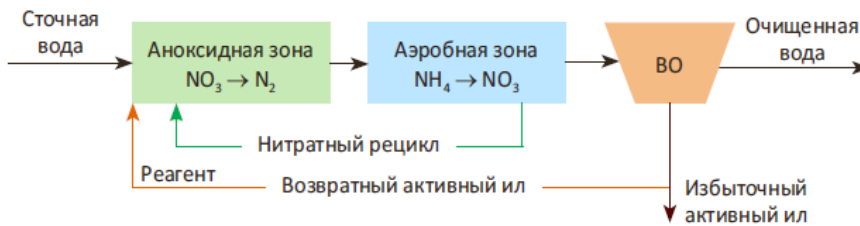
Выбор конкретной схемы удаления соединений азота и фосфора из сточных вод для реализации в промышленных аэротенках зависит, в первую очередь, от **качественного состава поступающих на биологическую очистку сточных вод и требований к качеству очищенной воды.**

В последнее время, когда теория биологического и химического удаления фосфора нашла свое отражение в реальных ТКП, для многих заказчиков стало неприятным сюрпризом количество реагентов, требуемое для химического удаления фосфора. Руководствуясь стремлением к минимизации эксплуатационных затрат, заказчик при сравнении различных ТКП придает ключевое значение количеству таких реагентов. К чему приводит данный подход? Естественно, в ТКП появляется то, что заказчик хочет увидеть, — уменьшение требуемого количества реагентов.

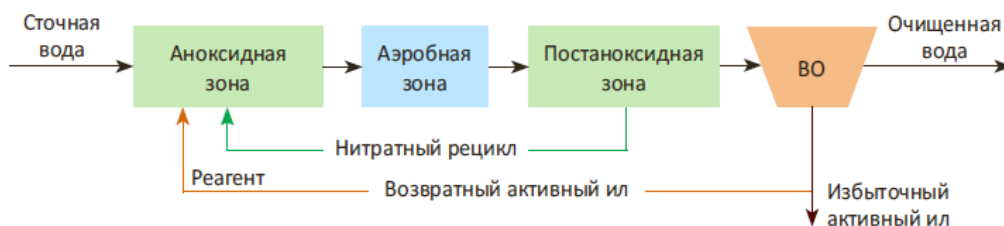
Однако необходимо понимать, что количество реагентов рассчитывается только на основании уравнений химических реакций. Если в ТКП указано, что фосфор удаляется с использованием химического метода, то количество реагентов не зависит от технологии биологической очистки, а зависит только от концентрации фосфора в поступающей сточной воде, требуемого качества очищенной воды по фосфору и точки ввода реагентов. Первые две позиции одинаковы вне зависимости от предлагаемой в ТКП технологии биологической очистки сточных вод. Максимальное различие в количестве реагентов в зависимости от точки их подачи составляет 2,5 раза [1].



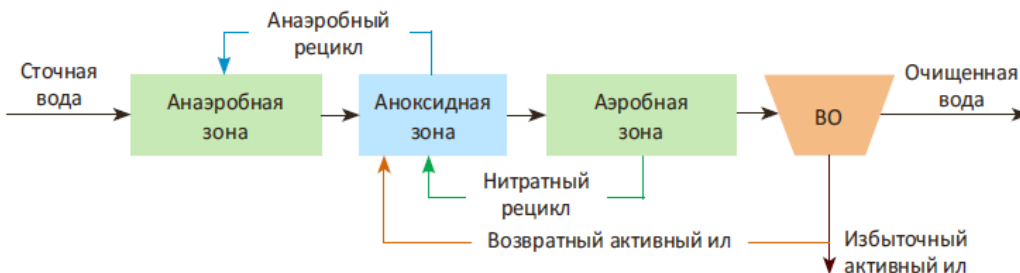
А. Схема с предвключенной денитрификацией и химическим удалением фосфора:



Б. Схема с пред- и постденитрификацией и химическим удалением фосфора:



В. Схема биологического удаления азота и фосфора — УСТ-процесс:



Г. Схема биологического удаления азота и фосфора — МУСТ-процесс:

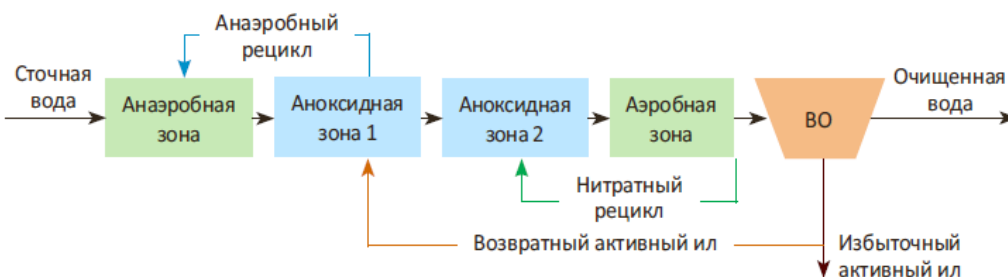


Рис. 1. Схемы промышленной реализации технологии удаления азота и фосфора из сточных вод



В настоящее время наблюдается следующая тенденция: в ТКП заявляется реализация биологического метода удаления фосфора, при этом из предлагаемой технологической схемы очевидно, что ни о каком биологическом удалении фосфора речи вообще идти не может. Следовательно, если в ТКП написано о реализации технологии биологического удаления фосфора по схеме, например, УСТ (МУСТ, VIP и т.д.), следует убедиться, действительно ли реально предлагаемая схема соответствует той, которая декларируется в ТКП.

ОЦЕНКА КОРРЕКТНОСТИ РАСЧЕТА ОБЪЕМОВ СООРУЖЕНИЙ

Следующим важным моментом, на который следует обратить внимание при анализе и оценке предлагаемых проектных решений, является правильность выполненных расчетов объемов сооружений, количества образуемых осадков⁶, технологических параметров работы оборудования (производительность воздуходувных машин, количество аэраторов, производительность насосов рецикла, требуемое количество реагентов, производительность сооружений обработки осадков и т.д.).

В настоящее время в Российской Федерации (как и в большинстве стран мира) отсутствует обязательная к применению методика расчета очистных сооружений. Обратимся к действующему на сегодняшний день СП 32.13330.2012:

Извлечение из СП 32.13330.2012

[...]

9.1.18. Расчет сооружений для очистки производственных сточных вод и обработки их осадков следует выполнять на основании данных научно-исследовательских и инжиниринговых организаций, опыта эксплуатации действующих аналогичных сооружений с учетом настоящего свода правил и норм проектирования предприятий соответствующих отраслей промышленности.

[...]

9.2.7.7. [...].

При использовании технологий совместного биологического удаления азота и фосфора объемы анаэробной, аноксидной и аэробной зон (либо периоды с аноксидными и аэробными условиями), а также конфигурацию расположения зон рекомендуется определять при помощи методов математического моделирования⁵.

[...]

⁴ О переработке осадков сточных вод см.:

– Дрозд Г.Я. Утилизация минерализованных осадков сточных вод: проблемы и решения // Справочник эколога. 2014. № 4. С. 84–96;

– Дрозд Г.Я. Переработка сточных вод: инновационное предложение для водоканалов // Справочник эколога. 2015. № 8. С. 86–96 (http://www.profiz.ru/eco/8_2015/osadki/) (прим. редакции).

⁵ Выделено автором.



Использование программных продуктов для расчета очистных сооружений эффективно для технолога высокого класса, а не обычного пользователя программы.

В связи с последним положением у заказчиков нет возможности запросить у разработчиков ТКП подробный расчет сооружений и оценить корректность его выполнения. В последнее время разработчики все чаще пишут в ТКП, что расчет был выполнен с применением того или иного программного продукта (программы), как будто использование программного продукта тождественно корректности выполнения расчетов. За этим лукавством лежит банальное стремление переложить ответственность на известность и общепризнанность в отрасли разработанных программных продуктов как надежных инструментов для расчетов.

В основе всех программных продуктов лежит матрица уравнений (формул), по которым программа и проводит расчет. Строго говоря, программа выполняет расчет с учетом введенных пользователем (технологом проектной организации) схемы очистных сооружений и входных данных. Некорректные данные о количественном и качественном составе сточных вод (см. выше) приводят к неверным результатам. Но самые критические ошибки возникают из-за несоответствия вводимых кинетических (скоростных) параметров рассмотренных выше биохимических процессов биологической очистки (окисление органических соединений, нитрификация, денитрификация, удаление фосфора) реальным показателям конкретных сточных вод (или конкретному типу сточных вод). Зачастую значения кинетических констант берутся из заложенной в программу таблицы значений «по умолчанию». В итоге полученные результаты (прежде всего, объемы сооружений) могут отличаться в разы от правильных.

Достаточно широкое распространение в настоящее время получили программные продукты (такие как BioWin, SIMBA, GPS-X, STOAT и др.), в основе которых лежит математическая модель ASM (Activated Sludge Model), описывающая все основные биохимические процессы очистки сточных вод. Модель активного ила ASM была разработана IAWQ Task Group on Mathematical Modelling for Design and Operation of Biological Wastewater Treatment в 1987 г. С тех пор она является наиболее детализированной моделью процесса биологической очистки сточных вод в плане рассмотрения различных компонентов загрязнений воды и типов микроорганизмов, а также процессов, происходящих внутри и вне клеток. На сегодняшний день уже разработаны второе (ASM-2, 1995 г.) и третье (ASM-3, 1998 г.) поколения этой модели [2, 3, 4].



В таблице 1 представлена матрица уравнений, описывающих скорости биохимических процессов очистки сточных вод в модели ASM-2.

Таблица 1. Выражения для скоростей процессов в ASM-2

№ п/п	Процесс	Скорость реакции r_i
Гидролиз		
1	Аэробный гидролиз	$K_h \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \frac{X_S / X_H}{K_X + X_S / X_H} X_H$
2	Аноксидный гидролиз	$K_h \pi_{NO_3} \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \frac{S_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} \frac{X_S / X_H}{K_X + X_S / X_H} X_H$
3	Анаэробный гидролиз	$K_h \pi_{Fe} \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \frac{K_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} \frac{X_S / X_H}{K_X + X_S / X_H} X_H$
Гетеротрофные микроорганизмы		
4	Аэробный рост на S_F	$\mu_H \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \frac{S_F}{K_F + S_F} \frac{S_F}{S_F + S_A} \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} X_H$
5	Аэробный рост на S_A	$\mu_H \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \frac{S_A}{K_A + S_A} \frac{S_A}{S_F + S_A} \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} X_H$
6	Аноксидный рост на S_F	$\mu_H \pi_{NO_3} \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \frac{S_{O_2}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} \frac{S_F}{K_F + S_F} \frac{S_F}{S_F + S_A} \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} X_H$
7	Аноксидный рост на S_A , денитрификация	$\mu_H \pi_{NO_3} \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \frac{S_{O_2}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} \frac{S_A}{K_A + S_A} \frac{S_A}{S_F + S_A} \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} X_H$
8	Ферментация	$q_{Fe} \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \frac{K_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} \frac{S_F}{K_F + S_F} \frac{S_{ALK}}{S_{ALK} + S_{ALK}} X_H$
9	$b_H X_H$	
Фосфатаккумулирующие микроорганизмы		
10	Накопление X_{PHA}	$q_{PHA} \frac{S_A}{K_A + S_A} \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \frac{X_P / X_{PAO}}{K_P + X_P / X_{PAO}} X_{PAO}$
11	Аэробное накопление X_{PP}	$q_{PHA} \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \frac{S_{PO_4}}{K_{PS} + S_{PO_4}} \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \frac{X_{PHA} / X_{PAO}}{K_{PHA} + X_{PHA} / X_{PAO}} \frac{K_{MAX} + X_P / X_{PAO}}{K_{IPP} + X_{MAX} - X_P / X_{PAO}} X_{PAO}$
12	Аноксидное накопление X_{PP}	$\rho_{12} \pi_{NO_3} \frac{K_{O_2}}{S_{O_2}} \frac{S_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}}$
13	Аэробное накопление X_{PAO}	$\mu_{PAO} \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \frac{X_{PHA} / X_{PAO}}{K_{PHA} + X_{PHA} / X_{PAO}} X_{PAO}$
14	Аноксидное накопление X_{PAO}	$\rho_{13} \pi_{NO_3} \frac{K_{O_2}}{S_{O_2}} \frac{S_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}}$
15	Распад X_{PAO}	$b_{PAO} X_{PAO} S_{ALK} / (K_{ALK} + S_{ALK})$
16	Распад X_{PP}	$b_P X_P S_{ALK} / (K_{ALK} + S_{ALK})$
17	Распад X_{PHA}	$b_{PHA} X_{PHA} S_{ALK} / (K_{ALK} + S_{ALK})$
Автотрофные микроорганизмы (нитрифицирующие)		
18	Аэробный рост	$\mu_{AUT} \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} X_{AUT}$
19	Распад	$b_{AUT} X_{AUT}$
Осаждение — растворение фосфатов металлов		
20	Осаждение	$k_{PRE} S_{PO_4} X_{MgOH}$
21	Растворение	$k_{RED} X_{MgP} S_{ALK}$

Как видно из табл. 1, в тех программных продуктах, на которые ссылаются большинство разработчиков ТКП, заложено 21 уравнение, каждое из которых включает несколько кинетических констант (максимальные скорости и константы полунасыщения для каждого из рассматриваемых процессов, температурные коэффициенты и т.д.).



Всего программа запрашивает порядка 50 кинетических характеристик. Как было сказано ранее, в программах даны только примеры значений этих характеристик, которые в свое время были определены на ограниченном количестве городских сточных вод, причем в основном не российских. Таким образом, их нельзя применять, например, для производственных сточных вод.

Использование таких программ как инструмента для расчетов эффективно для технолога высокого класса, а не просто пользователя программного продукта. Специалист должен понимать внутреннюю структуру биохимических процессов очистки сточных вод, заложенных в программу, и изменять в программе значения кинетических характеристик процессов в соответствии с конкретным типом сточных вод или проводить натурные исследования конкретных сточных вод и определять значения данных параметров.

В таблице 2 представлены требования к качеству очищенной воды в Российской Федерации и странах Европейского союза.

Таблица 2. Требования к качеству очищенной воды в Российской Федерации и странах Европейского союза

Параметр	Российская Федерация		Страны Европейского союза	
	Водоемы культурно-бытового назначения	Водоемы рыбохозяйственного назначения	До 100 000 эквивалентных жителей	Более 100 000 эквивалентных жителей
БПК ₅			до 25	до 25
БПК _{полн}	6	3		
ХПК	30	15	до 120	до 80
N _{общ}			15	10
N-NH ₄		0,39		1
N-NO ₃		9,1		
N-NO ₂		0,02		
P _{общ}			до 2	0,1–1,0
P-PO ₄		0,2		

Как мы видим, в России и странах Евросоюза не только предъявляются различные требования к значениям отдельных качественных характеристик очищенных сточных вод, но и различаются сами контролируемые показатели.

Особое внимание следует обратить на разницу контролируемых показателей по формам азота. В России к качеству очищенных сточных вод предъявляются отдельные требования по азоту аммонийному (0,39 мг/л), азоту нитратному (9,1 мг/л) и азоту нитритному (0,02 мг/л). В странах Евросоюза в большинстве случаев предъявляют интегральные требования по азоту — по азоту общему, и только в отдельных случаях дополнительные требования предъявляются по азоту аммонийному (как правило, минимальное требуемое значение — 1,0 мг/л). При этом требование по азоту нитритов, как правило, вообще не устанавливается. Таким образом, при сравнении требований к качеству очищенных сточных вод в России и странах Евросоюза по азоту можно говорить о сопоставимых требованиях по азоту нитратному и о существенно более жестких нормативах в России по аммонийному азоту и азоту нитритов.

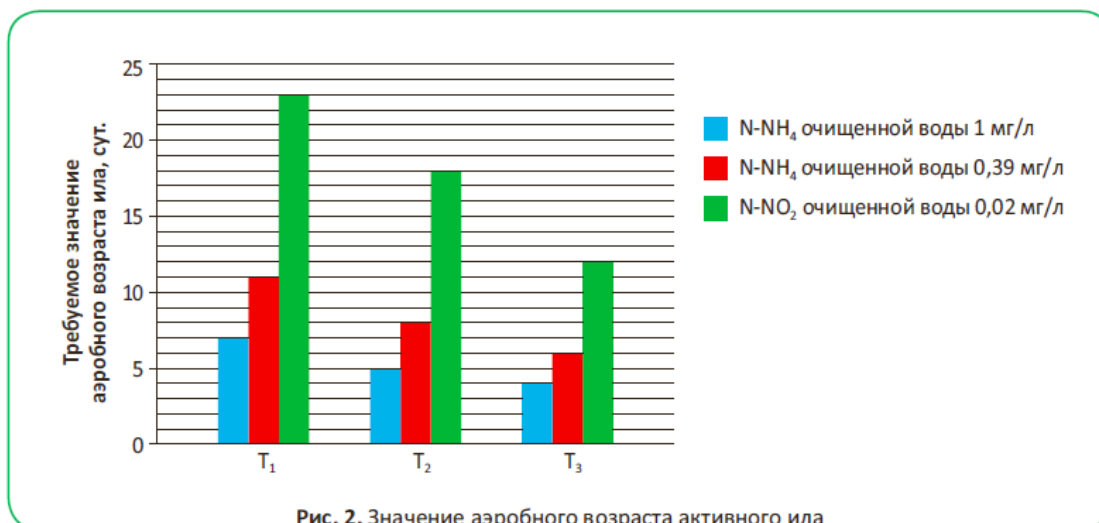


Рис. 2. Значение аэробного возраста активного ила для различных значений температуры иловой смеси

На рисунке 2 представлены расчетные значения аэробного возраста активного ила, которые обеспечивают следующее качество очищенной воды:

- аммонийный азот — 1 мг/л (синие гистограммы), при этом качество очищенной воды по азоту нитритов не лимитируется;
- аммонийный азот — 0,39 мг/л (красные гистограммы), при этом качество очищенной воды по азоту нитритов не лимитируется;
- азот нитритов — 0,02 мг/л (зеленые гистограммы).

Расчет был выполнен нами по модели М. Хенце ASM 2d [3]. Из представленных на рисунке результатов видно, что если для обеспечения требуемых нормативов качества очищенной воды по азоту для стран Евросоюза значение аэробного возраста активного ила должно составлять в диапазоне рабочих температур иловой смеси 5–8 суток, то для выполнения российских требований по аммонийному азоту аналогичные значения аэробного возраста активного ила должны быть 7–12 суток для данного диапазона температур иловой смеси. Однако указанные значения аэробного возраста активного ила не позволяют обеспечить соблюдение требований к качеству очищенной воды по азоту нитритов (содержание азота нитритов составит только 0,07–0,11 мг/л). Для обеспечения требуемого качества очищенной воды по азоту нитритов значение аэробного возраста активного ила для рассматриваемых сточных вод должно составлять в аналогичном диапазоне температур иловой смеси 13–24 суток.

На указанный факт необходимо обращать внимание при выборе метода расчета аэротенков. В настоящее время при проектировании сооружений биологической очистки, работающих по технологии удаления азота и фосфора, многие проектные организации, не использующие программных продуктов, применяют методику расчета аэротенков по Standard ATV-DVWK-A131 E. Dimension of Single-Stage Activated Sludge Plants 2000. Данная методика используется сегодня в странах Евросоюза для расчета сооружений биологической очистки, хотя параллельно применяются и другие методы расчета.



В основе методики (разделы расчетов аэротенков) лежат эмпирические зависимости, которые являются следствием расчетов по формулам ферментативной кинетики процессов, в т.ч. и указанной выше модели М. Хенце ASM 2d. При этом расчет был проведен на качественные показатели очищенной воды, соответствующие стандартам западных стран (общий азот — 10 мг/л, аммонийный азот — 1 мг/л). Кроме того, согласно описанию данной методики она применима только для городских сточных вод.

ОЦЕНКА КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ ПРЕДЛАГАЕМОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ

Только после анализа и оценки технологических решений следует переходить к рассмотрению конструктивного исполнения предлагаемой технологии.

На рисунке 3 представлены результаты расчетов отношений объемов аэротенков, работающих по технологиям:

- окисления органических соединений и глубокой нитрификации;
- окисления органических соединений и нитри-денитрификации;
- окисления органических соединений, нитри-денитрификации и химического удаления фосфора, — к объему аэротенка, запроектированного под классическую технологию окисления только органических соединений.

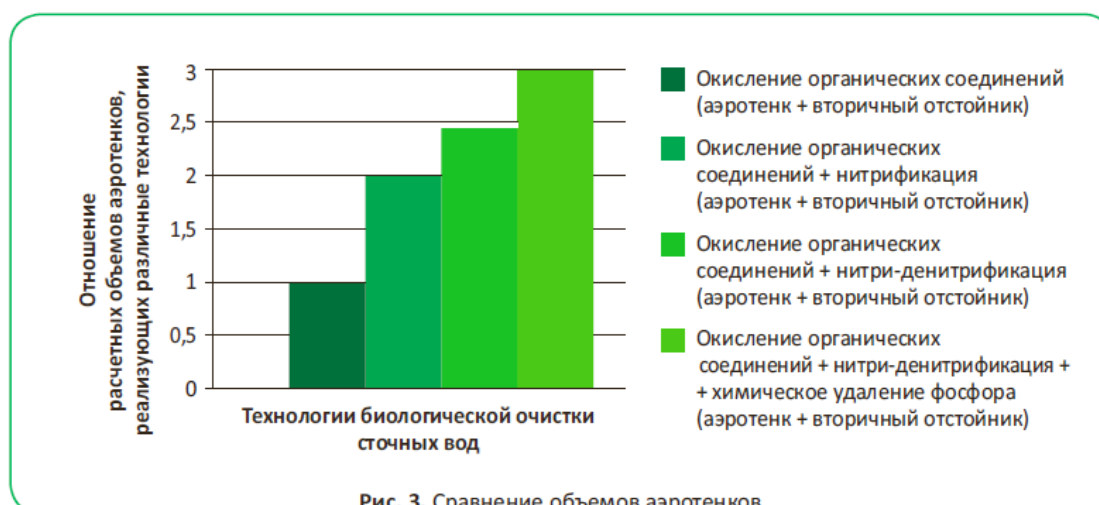


Рис. 3. Сравнение объемов аэротенков, реализующих различные технологии очистки сточных вод

Расчеты проводились для сточной воды, поступающей на биологическую очистку и обладающей следующими характеристиками:

- БПК_{полн} = 230 мг/л;
- концентрация взвешенных веществ — 210 мг/л;
- концентрация аммонийного азота — 33 мг/л;
- концентрация фосфора фосфатов — 6 мг/л;
- температура сточных вод — 15 °С.



Характеристики очищенной воды при расчете принимались следующие:

- БПК_{полн} = 3 мг/л;
- концентрация N-NH₄ — 0,39 мг/л;
- концентрация N-NO₃ — 9,1 мг/л;
- концентрация N-NO₂ — 0,02 мг/л;
- концентрация P-PO₄ — 0,2 мг/л.

Таким образом, реализация технологий очистки сточных вод от азота и фосфора, обеспечивающих качество очищенных сточных вод на уровне ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения, требует увеличения объемов аэротенков в несколько раз. В связи с этим в последнее время широкое внедрение получили технологии, позволяющие повышать окислительную мощность сооружений за счет увеличения концентрации биомассы и ее активности. К таким технологиям в первую очередь относятся **мембранные технологии**.

Мембранный биореактор (МБР, MBR) представляет собой сооружение, где в аэротенке реализуются различные технологии биологической очистки сточных вод, а для илоразделения используются не вторичные отстойники, а ультрафильтрация. В результате доза активного ила в аэротенке увеличивается до 8–10 г/л, при этом проблема выноса повышенных концентраций взвешенных веществ, свойственная классическим технологиям «аэротенк + вторичный отстойник», отсутствует. Увеличение количества биомассы в системе позволяет пропорционально сократить объемы сооружений. Использование мембранного илоразделения позволяет увеличивать дозу ила в аэротенках в 2–5 раз, соответственно снижая объемы аэротенков. Объемы же мембранных резервуаров в разы меньше, чем объемы вторичных отстойников. Таким образом, использование мембранных биореакторов позволяет в несколько раз — в сравнении с традиционными технологиями «аэротенк + вторичный отстойник» — увеличить окислительную мощность сооружений и при этом отказаться от вторичных отстойников и сооружений доочистки (рис. 4).

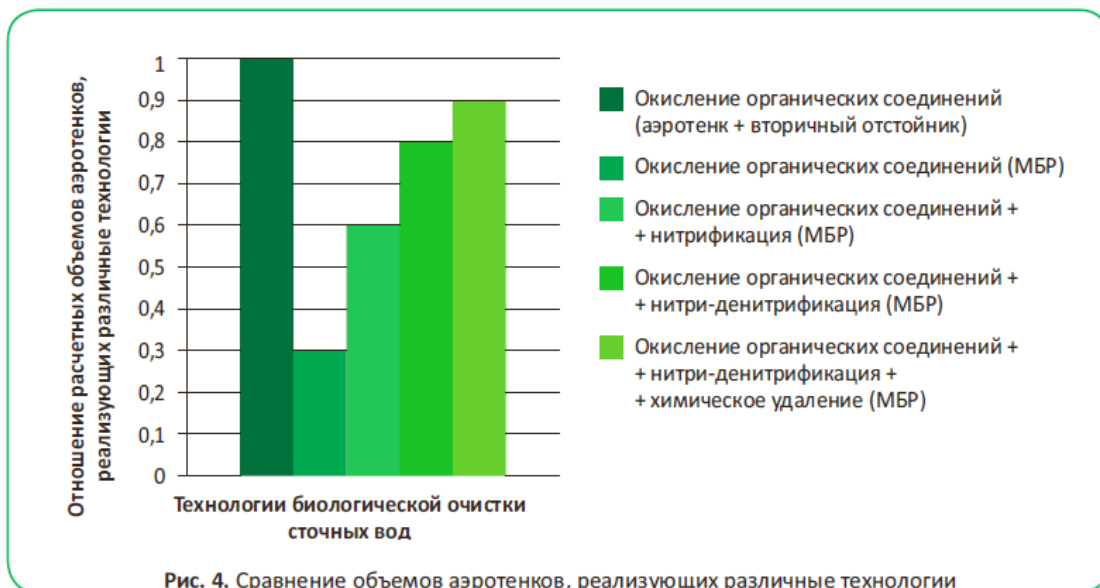


Рис. 4. Сравнение объемов аэротенков, реализующих различные технологии очистки сточных вод в МБР и классическую технологию «аэротенк + вторичный отстойник»



Как видно из рис. 4, применение МБР позволяет реализовать технологии удаления азота и фосфора из сточных вод в аэротенках с объемами, не превышающими объемы классических аэротенков, реализующих схемы окисления только органических соединений. При этом из схемы полностью исключаются вторичные отстойники и сооружения доочистки.

Использование мембранных технологий для биологической очистки производственных сточных вод, сточных вод коттеджных поселков, новых микрорайонов с собственной инфраструктурой позволяет добиться стабильного качества очищенной воды при минимизации площадей, занятых непосредственно под очистные сооружения (что, согласитесь, немаловажно).

Рассматривая преимущества мембранных технологий для очистки сточных вод, нельзя не отметить тенденцию последних лет, которая заключается в снижении эксплуатационных затрат на аэрацию мембран всех ведущих мировых производителей. Это объясняется совершенствованием систем аэрации мембран. При этом данные сооружения стабильно обеспечивают следующее качество очищенной сточной воды:

- $BPK_{\text{полн}} = 3 \text{ мг/л}$;
- концентрация $N-NH_4$ — менее $0,39 \text{ мг/л}$;
- концентрация $N-NO_2$ — $0,02 \text{ мг/л}$;
- концентрация $P-PO_4$ — $0,15 \text{ мг/л}$.

ПОДВОДИМ ИТОГИ

Выбор ТКП на реконструкцию существующих (или строительство новых) сооружений биологической очистки сточных вод следует начинать с оценки корректности заложенной в нем технологической схемы, затем перейти к оценке расчета объемов сооружений, значений рециклов, требуемого количества воздуха, реагентов и т.д. и только потом рассматривать варианты технической (конструктивной) реализации данной технологической схемы.

Если технологическая схема очистки сточных вод от азота и фосфора для конкретных сточных вод выбрана неверно и/или расчеты выполнены некорректно, то вне зависимости от изящества конструктивных, надежности технических и аппаратных решений качество очищенной воды не будет соответствовать заявленному. И, конечно, для достижения общей цели — стабильного качества очищенных сточных вод — необходим профессиональный подход как со стороны компании, предлагающей свои решения, так и со стороны заказчика, корректно оценивающего предлагаемые ТКП в соответствии с собственными приоритетами.



ВЫВОДЫ

1. Оценка заказчиком представленного ему ТКП на реконструкцию существующих (или на строительство новых) очистных сооружений должна основываться на проведенном заказчиком технологическом анализе и проверочном расчете предлагаемых решений.

2. Для обеспечения соблюдения современных требований к качеству очищенной воды на сооружениях биологической очистки должны реализовываться такие процессы, как окисление органических соединений, нитрификация, денитрификация, химическое, биологическое или биолого-химическое удаление фосфора.



3. Сооружения, рассчитанные на средние значения количественного и качественного состава сточных вод, не позволят достичь требуемого качества очищенной воды в те периоды времени, когда расходы и концентрации сточных вод будут превышать средние значения. Сооружения, рассчитанные не на минимальные температуры сточных вод, не позволят добиться требуемых качественных показателей (в первую очередь по аммонийному азоту и азоту нитритов) в течение времени, равного сумме периодов температур ниже расчетных, и значения аэробного возраста активного ила.

4. Применение при проектировании КОС существующих программных продуктов сопряжено с необходимостью определения значений порядка 50 кинетических параметров уравнений, заложенных в данные программы, что часто приводит к появлению погрешностей. Специалист, использующий программу для проектирования, должен понимать внутреннюю структуру биохимических процессов очистки сточных вод, заложенных в программу, и применять в программе значения кинетических характеристик процессов в соответствии с конкретным типом сточных вод или проводить натурные исследования конкретных сточных вод и определять значения данных параметров.

5. Реализация технологий очистки сточных вод от азота и фосфора, обеспечивающих качество очищенных сточных вод на уровне ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения, требует увеличения объемов аэротенков в несколько раз по сравнению с технологиями только окисления органических соединений. В связи с этим в последнее время широкое внедрение получили технологии, позволяющие повышать окислительную мощность сооружений за счет увеличения концентрации биомассы и ее активности (в первую очередь, мембранные технологии).

Литература

1. Харькина О.В. Эффективная эксплуатация и расчет сооружений биологической очистки сточных вод. Волгоград: Панорама, 2015. 433 с.
2. Henze M., Grady C.P.L., Gujer W., Marais G.v.R., Matsuo T., Activated sludge model No.1. IAWPRC, London 1986.
3. Henze M., Gujer W., Marais G.v.R., Matsuo T., Wentzel M.C. Activated sludge model No.2. IAWQ, London 1995.
4. Henze M., Gujer W., Marais G.v.R., Matsuo T., Wentzel M.C. Activated sludge model No.3. IAWQ, London 1998. 🌱