



# АНАЛИЗ МЕТОДИК РАСЧЕТА ПРОЦЕССА НИТРИ-ДЕНИТРИФИКАЦИИ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В МИРОВОЙ ПРАКТИКЕ, И ИХ РАЗВИТИЯ (ЧАСТЬ 1-Я)

Эпов А.Н.<sup>1</sup>  
гл. техн. специалист

Данилович Д.А.<sup>2</sup>  
канд. техн. наук,  
руководитель

Канунникова М.А.<sup>1</sup>  
канд. техн. наук,  
руководитель

1 – ООО «Домкнопстрой»

2 – Центр технической политики и модернизации в ЖКХ, Ассоциация «ЖКХ и городская среда»

Основным мероприятием по повышению качества очистки на очистных сооружениях является перевод их на технологии удаления азота и фосфора. Стоимость и эффективность этой работы во многом зависят от того, насколько правильно будут проведены технологические расчеты новых технологий. Статья продолжает дискуссию, начатую в 2017 г. на страницах отраслевых изданий между сторонниками методики НИИ ВОДГЕО и специалистами, выступающими за применение международных апробированных методов расчета. В поддержку высказываемой авторами позиции о приоритетности расчета процесса нитрификации на основе обеспечения необходимого аэробного возраста ила и о недостатках расчета на основе скорости процесса приведен детальный анализ мировых трендов развития методологии этих расчетов. Изложены основные положения 6 ведущих методик и учебных пособий, в большинстве своем ранее не публиковавшихся на русском языке, показывающие, в частности, выведение уравнений расчета на основе аэробного возраста ила из уравнения Моно и базовых закономерностей массового баланса. По мнению авторов, подход, используемый в методике НИИ ВОДГЕО, коренным образом расходится с трендом расчетов процессов удаления биогенных элементов в мировой практике.

**Ключевые слова:** нитрификация, денитрификация, аммонийный азот, методика расчета, скорость процесса, ферментативная кинетика, уравнение Моно, аэробный возраст ила.

## Предисловие

В №4 журнала ВВВ за 2017 г. нами была опубликована статья «Сравнительный анализ методик расчета сооружений биологической очистки сточных вод с удалением азота» [1], которая значительным образом была посвящена методике расчета НИИ ВОДГЕО. Непосредственным поводом к написанию этой статьи послужило предложение включить данную методику в Свод Правил СП 32.13330.2012. Канализация. Наружные сети и сооружения, как обязательное приложение. Поскольку как таковая методика на момент выхода нашей статьи нигде не была опубликована и, возможно, и не существовала в окончательном виде, она была проанализирована по статье, описывающей порядок расчета сооружений биологической очистки, опубликованной д-ром техн. наук В.Н. Швецовым и канд. техн. наук К.М. Морозовой в 2013 году [2]. В нашей статье было, в частности, отмечено, что в методике НИИ ВОДГЕО:

- не учитывается концентрация биомассы нитрификаторов в иле, зависящая от соотношения органики и азота в поступающей воде;
- используются значения кинетических коэффициентов для расчета скоростей нитрификации и денитрификации (или напрямую значения удельных скоростей, по графикам), полученные, как утверждают ее авторы, путем статистического анализа. Однако, многофакторность влияния на эти процессы в действующих сооружениях не позволяет получить корректные данные, пригодные для использования в широком диапазоне исходных условий при расчете;
- не учитывается  $pH$  и концентрация растворенного кислорода. Авторы методики подразумевают учет этих факторов в значениях скоростей нитрификации и денитрификации в результате статистического анализа, что только подтверждает предыдущее высказывание;

- скорость денитрификации рассчитывается исключительно по концентрации азота нитратов на выходе, т.е. не по концентрации окисляемого субстрата, как по уравнению Моно, а по концентрации акцептора электронов. Это все равно, что рассчитывать окисление органики или азота по концентрации растворенного кислорода.

На основании изложенного был сделан вывод, что рассмотренная методика не должна применяться в качестве основной и, тем более, арбитражной при расчетах нитри-денитрификации.

В №10 за 2017 год в журнале «Водоснабжение и санитарная техника» была опубликована ответная статья одного из двух авторов критикованной нами методики [3], д-ра техн. наук В.Н. Швецова, в которой было выражено полное несогласие со всеми позициями нашей критики. К нашему глубокому сожалению, наш уважаемый оппонент не ответил по существу ни на один из наших принципиальных аргументов (кроме указания на два недочета в изложении, никак не влияющих на логику и содержание статьи). Однако, данная статья изобиловала такого рода «контраргументами»: *«Аргументы, которые используют в статье уважаемые коллеги для «доказательства» своих выводов, строятся исключительно на выражениях типа: «очевидно», «не используется ни в одной модели...», «с этой информацией согласуется собственный опыт авторов...», «подавляющее большинство известных авторам сооружений...», «как известно», «показано», «хорошо известно», без ссылок на источники (имеется ссылка на книгу М. Хенце без указания конкретных страниц и одна ссылка на свои работы).»* Имело место даже такое энергичное высказывание: *«Взамен (вероятно, вслед за изречением известного персонажа «заграница нам поможет») предлагается весьма сомнительная зарубежная методика, предназначенная (как утверждают сами авторы этой методики) для решения узкого круга задач, не характерных для условий нашей страны. Это тем более удивительно в условиях жесточайших санкций, применяемых к нашей стране со стороны этой самой «заграницы»».*

К сожалению, мы вынуждены напомнить, что в этой самой «загранице» были разработаны те самые классические уравнения, на которых пытались построить свою методику в

НИИ ВОДГЕО. Автор одноименного уравнения Жакоб Моно был французом, авторы основного уравнения ферментативной кинетики, разработанного 104 года назад и явившегося основой для уравнения Моно, Леонор Михаэлис и Мод Ментен – соответственно, немцем и канадцем, Джон Холдейн, который развил эту теорию 92 года назад – британцем. Также мы вынуждены напомнить оппоненту, что период борьбы с генетикой – «продажной девкой империализма» в нашей стране завершился около 60 лет тому назад. Процитированный призыв к использованию «отечественных разработок», в реальности сводящихся к некорректному использованию классического уравнения, созданного за рубежом более 100 лет тому назад, вызывает у нас глубокое сожаление.

Мы в состоянии подвергнуть ответной критике статью нашего уважаемого оппонента абзац за абзацем и даже начали это делать, однако, пришли к выводу, что такого рода полемика в стиле «кто что сказал» не в состоянии дать читателю какую-либо новую информацию, зато гарантированно его запутает, т.к. оперировать анализом текстов, написанных уже в трех предыдущих статьях данной полемики, практически невозможно.

Поэтому мы решили реализовать наш ответ в полемике, прежде всего, в виде подробного рассказа о методиках расчета процесса нитри-денитрификации (в первую очередь нитрификации), применяемых в мировой практике и их развитии, на базе знания которых мы и подвергли критике модель НИИ ВОДГЕО. Анализ мировой практики расчета процессов нитри-денитрификации также необходим для разработки отечественных методов расчёта. Эта тема будет раскрыта в настоящей статье. В ней мы также прокомментируем ряд утверждений нашего оппонента. Для рассмотрения и анализа мы использовали целый ряд авторитетных в мировой профессиональной среде руководств и учебников, такие как (приводим названия в примерном переводе, конкретные ссылки на них будут даны ниже):

- Руководство по удалению азота Агентства по охране окружающей среды США (1993 г.).
- Регулярно переиздаваемый учебник по инженерингу очистки сточных вод Metcalf & Eddy (2003).



- Учебник по биологической очистке сточных вод, написанный такими международными авторитетами в этой области, как М. Хенце, М. ван Лусдрехт, Дж. Екама (2008).
- Еще один американский учебник по передовым процессам биологической очистки (2009 г.).
- Немецкий учебник по биологической очистке сточных вод (2007).
- Известный в России и переведенный на русский язык учебник М.Хенце и его коллег (2004).

Вторую часть данной статьи мы планируем посвятить более детальному анализу немецкой методики расчета ATV -131, которая, по мнению нашего оппонента, является набором «неких правил и коэффициентов, принимаемых или назначаемых проектировщиком, исходя из его опыта и интуиции». В этой статье мы покажем, что методика ATV-131 хоть и не является верхом совершенства, но, в отличие от методики НИИ ВОДГЕО, грамотно выведена из базовых кинетических уравнений процессов и учитывает целый ряд важных дополнительных факторов. Это и позволяет ей быть ведущей в Европе методикой расчета, которой пользуются сотни европейских специалистов. После чего во второй части статьи мы планируем на основе изложенной весьма обширной информации еще раз вернуться к краткой сравнительной оценке методики НИИ ВОДГЕО и анализу основных заблуждений нашего оппонента.

В нашей первой, критической, статье [1] мы написали, что она «рассчитана на широкого читателя, не погруженного в теорию процессов биологической очистки, но занимающегося проектированием таких сооружений. Поэтому мы постарались в статье обойтись практически без формул, и изложить все максимально простым языком». Даже это наше желание сделать обсуждение теории процесса не скучным и максимально понятным вызвало негативную реакцию оппонента, назвавшего это «своеобразным жанром», а таких читателей – «весьма странным контингентом».

Эта статья, напротив, насыщена большим количеством формул (собственно, она им и посвящена), включая основные положения их вывода, а также логику их усовершенствования (те самые «аргументы и ссылки», о необходимости которых писал наш оппонент), за что мы заранее извиняемся

перед нашими читателями. Мы по-прежнему убеждены, что подавляющее большинство читателей журнала и специалистов отрасли являются практиками, повседневная деятельность которых далека от анализа кинетических уравнений. Поэтому мы приложили все от нас зависящее, чтобы сделать описание методик расчета максимально понятным, в пределах возможного, а также практически полезным.

Обращаем внимание читателей, что написание условных обозначений величин в формулах мы дали в авторской транскрипции, чтобы облегчить для желающих это сделать возможность более углубленно изучить тексты ведущих мировых авторитетов, работы которых мы проанализировали. К сожалению, эти обозначения, даже в схожих по смыслу формулах, для разных цитируемых источников не всегда совпадают, что будет требовать от читателя внимательности.

### Математические модели и методики для ручных расчетов

Вначале мы бы хотели остановиться на таком частном, но важном для понимания вопросе, что можно считать математическими моделями и, так называемыми, методиками для ручных расчетов. В нашей первой статье мы использовали и противопоставляли эти два понятия, что вызвало непонимание со стороны оппонента, назвавшего второе из них новым термином.

Понятие методики, предназначенной для расчета вручную, в мировой практике вполне определено (и, вопреки мнению оппонента, новым термином не является), такие методики именуются обычно Design Manual или Design Guide и представляют собой полный набор формул, таблиц и определений с оговоренной последовательностью их использования, позволяющий провести расчет процесса с использованием калькулятора или простого программного обеспечения типа расчетных таблиц Excel.

Что касается математических моделей и возмущения нашим оппонентом тем, что методика НИИ ВОДГЕО не отнесена к ним («Оппоненты странным образом вообще не относят к математическим моделям методику НИИ ВОДГЕО»), то, конечно, в очень широком смысле к математическим моделям можно отнести даже второй закон Ньютона. В нашем случае системы расчета, называемые математическими моделями, не только

содержат большое количество уравнений, подробно описывающих процесс (так, наиболее часто используемая одним из авторов ASM2d описывает 21 процесс с участием 18 субстратов), а имеют более существенные отличия. Во-первых, при описании математических моделей используются матрицы Петерсона, которые позволяют свести полностью материальный баланс всех процессов. Для методик расчета вручную это не применяется, так как потребует большого количества дополнительных вычислений. Во-вторых, современные модели позволяют описывать неравномерность процессов в пространстве (по длине аэротенка или по глубине биопленки) и во времени. Для методик расчета вручную это практически невозможно, так как требует численного интегрирования большого числа нелинейных дифференциальных уравнений. Поэтому расчет по математическим моделям осуществляется с помощью специального программного обеспечения (названия наиболее известных представлены в [4]).

По указанным причинам мы не относим упоминавшиеся методики НИИ ВОДГЕО и ATV 131, а также американскую Manual Nitrogen Control, китайскую HJ 576-2010 и ряд других описанных в литературе методов расчета сооружений с нитриденитрификацией к математическим моделям.

В нашей первой статье [1] мы обозначили соотношение и место методик для расчета вручную и математических моделей в отраслевых практиках. Ввиду важности этого вопроса кратко повторим здесь эти рекомендации:

- для сооружений, принимающих свыше 20-50 тыс. м<sup>3</sup>/сутки, рекомендуется выполнять расчеты с использованием современных расчетных программ, привлекая для этого высококвалифицированные специализированные организации, специалисты которых хорошо владеют данными программами;
- методики ручного расчета более оптимальны для расчета сооружений на предпроектной стадии, при экспертизах, при меньшей производительности, объектов, проектируемых для потоков сточной воды, которых еще не существует, а также при решении эксплуатационных задач на сооружениях такого масштаба. Кроме того, мы убеждены, что обучение специалистов, как вузовское, так и поствузовское, может производиться только на базе методик для

ручных расчетов. Математические модели являются продолжением и развитием этих методик, и хорошее понимание моделей невозможно без знания данных методов.

Такое разграничение вызвано тем, что основной сложностью использования математических моделей, кроме весьма и весьма важного фактора наличия не только самих моделей (лицензированных!), но и квалифицированных специалистов, является необходимость использования аналитических данных по сточным водам, не входящих в стандартный набор производственного контроля и требующих специального отбора проб и анализа по нестандартным методикам. Это делает использование математических моделей, как и любого из высокопрофессиональных инструментов, весьма дорогостоящим делом.

## Расчет процесса нитрификации

Одна из основных причин нашего несогласия с оппонентом по расчету процесса нитрификации является различная оценка применимости двух путей решения этой задачи: по скорости окисления аммонийного азота и по возрасту ила.

### Методика EPA

Одной из первых в мире является методика расчета нитри-денитрификации, в частности, описанная в руководстве, выпущенной Агентством по охране окружающей среды США (EPA) [5]. В данной методике допускаются два вышеупомянутых способа расчета.

Удельная скорость нитрификации рассчитывается по уравнению ферментативной кинетики:

$$q_N = q_N^{\wedge} \cdot \frac{N}{K_N + N}, \quad (1)$$

где  $q_N$  – скорость нитрификации мг  $N-NO_3/г$  биомассы в сутки;

$K_N$  – коэффициент полунасыщения мг  $N-NO_3/л$ , принимаемый равным 1 мг/л;

$N$  – концентрация азота;

$q_N^{\wedge}$  – максимальная скорость нитрификации мг  $N-NO_3/г$  биомассы в сутки – рассчитывается как

$q_N^{\wedge} = \frac{\mu^{\wedge}}{Y_N^{\wedge}}$  или  $q_N^{\wedge} = 2,35 * e^{0,098(T-15)}$  (см. расчет максимальной скорости роста биомассы),

где  $\mu^{\wedge}$  – максимальная скорость роста биомассы;



$Y'_N$  – коэффициент прироста микроорганизмов нитрификации обеих фаз (суммарный коэффициент прироста микроорганизмов, окисляющих азот до  $NO_2$  и  $NO_3$ ) нитрификации принят 0,2 мг СВ/ мг окисленного азота.

Данное уравнение относится только к микроорганизмам-нитрификаторам.

Далее время пребывания в аэротенке вычисляется по формуле:

$$t = \frac{N_0 - N_t}{q_N \cdot X_N} \quad (2)$$

где  $t$  - время окисления;

$q_N$  – скорость окисления аммонийного азота, определяемая ферментативной кинетикой по уравнению Моно;

$N_0, N_t$  – начальные и конечные концентрации азота;

$X_N$  – концентрация нитрифицирующих микроорганизмов, которую предлагалось определять через прирост нитрификаторов и гетеротрофов в соответствии с количеством потребленных субстратов и коэффициентами прироста:

$$X_N = \frac{Y'_N \cdot (N_0 - N_t)}{Y'_N \cdot (N_0 - N_t) + Y_H \cdot (S_0 - S_t)} \cdot X_t \quad (3)$$

где  $Y_H$  – коэффициент прироста микроорганизмов гетеротрофов – 0,5 мг СВ/мг окисленного БПК<sub>5</sub>;

$S_0$  – начальная концентрация субстрата по органическим веществам (в данном случае БПК<sub>5</sub>);

$S_t$  – концентрация БПК<sub>5</sub> в очищенной воде;

$X_t$  – концентрация ила в аэротенке.

В методике ВОДГЕО расчет производится по формуле (2), однако, вместо корректной величины  $X_N$  (концентрация нитрифицирующих микроорганизмов), используется общая концентрация ила  $X_t$ , а величина  $q_N$  определяется не для биомассы нитрификаторов, а для общей концентрации ила. Это упрощение, по нашему мнению, недопустимо и определило принципиальное различие методики ВОДГЕО с методикой, описанной в руководстве ЕРА и, как будет показано далее, со всеми зарубежными методиками расчета.

Однако ещё в 40-е годы прошлого века в США было установлено, что при использовании в расчетах величины  $X_t$  скорость нитрификации (1) является переменной величиной и отнесенная ко

всей биомассе ила, зависит не только от температуры, но и от соотношения БПК<sub>5</sub> и азота [6]. Причем это различие может быть кратным даже при одинаковой температуре (рис. 1).

По оси абсцисс – температура, °С, по оси ординат – удельная скорость нитрификации, г  $N-NH_4/2$  беззольного вещества активного ила.

Приведенные на рисунке 1 экспериментальные точки относятся к двум очистным сооружениям в США: Blue Plains (г. Вашингтон) и CCSD (г. Cambria, штат Калифорния) и получены для различных соотношений БПК<sub>5</sub>/Общий азот (BOD<sub>5</sub>/TKN), зафиксированных на этих сооружениях.

Данное явление было обосновано изменением удельного количества (удельной концентрации) нитрификаторов в иле как следствия соотношения субстратов для нитрификации (общий азот) и гетеротрофного окисления (БПК<sub>5</sub>). Поэтому для дальнейших вычислений была введена величина  $X_N$  – концентрация нитрифицирующих микроорганизмов (3). *Авторы методики ВОДГЕО вышеописанного очевидного факта не учитывают. Наш оппонент утверждает следующее: «В соответствии с уравнением Моно, фракционный состав биомассы формируется не в зависимости от исходных концентраций, а главным образом от скоростей роста (или окисления субстратов) соответствующих видов микроорганизмов. Эти скорости определяются остаточными концентрациями субстратов, т.е. требуемой степенью очистки».* Как видно на рисунке 1, данное заблуждение при определении объемов сооружений может приводить к ошибкам до 300% и более.

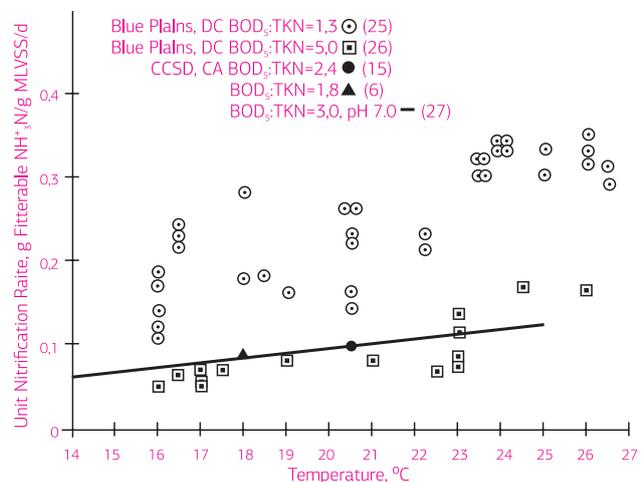


Рисунок 1

Зависимость скорости нитрификации от температуры и соотношения БПК<sub>5</sub> к общему азоту (по [6]).

Уравнение Моно отражает не итог формирования фракций в биоценозе, а именно скорость роста микроорганизмов. То есть то, с какой скоростью будут расти микроорганизмы при заданной концентрации, действительно определяется уравнением Моно, а сколько их всего вырастет – количеством усвоенного субстрата и удельным приростом.

Вернемся к рассматриваемой американской методике EPA [5]. Хотя в ней приведен корректный путь расчета по скорости окисления, однако, был сделан вывод, что из-за необходимости определения фракций нитрификаторов такой расчет менее точен, чем расчет через возраст ила (примечание: здесь и далее для расчёта нитрификации используется исключительно аэробный возраст ила, т.е. среднее время пребывания ила в аэротенке в условиях, при которых нитрификаторы могут расти). Он связан с основными кинетическими величинами следующим выражением:

$$\frac{1}{\theta_c} = \mu_N - b_N = \mu'_N, \quad (4)$$

где  $\theta_c$  – возраст ила;

$\mu_N$  – скорость роста нитрификаторов;

$b_N$  – скорость отмирания нитрификаторов (принята  $0,05 \text{ сут}^{-1}$ );

$\mu'_N$  – наблюдаемая скорость роста нитрификаторов.

Соответственно,

$$\theta_c = \frac{1}{\mu_N - b_N} \quad (5)$$

Для вычисления возраста по (5) вначале по уравнению Моно рассчитывают скорость роста нитрификаторов:

$$\mu_N = \mu^{\wedge} \cdot \frac{N}{K_N + N}, \quad (6)$$

где  $\mu^{\wedge}$  – максимальная скорость роста;

$N$  – концентрация азота аммонийного;

$K_N$  – коэффициент полунасыщения, принятый равным  $1 \text{ мг/л}$ .

Максимальная скорость роста при расчете по (4) принята  $0,47 \text{ сут}^{-1}$  при температуре  $15^\circ\text{C}$ , с поправкой на температуру в аэротенке:

$$\mu^{\wedge}_N = 0,47 \cdot e^{0,098(T-15)}, \quad (7)$$

где  $T$  – температура,  $^\circ\text{C}$ .

Тогда скорость роста нитрификаторов, используемая для расчета возраста, определяется как:

$$\mu_N = 0,47 \cdot e^{0,098(T-15)} \cdot \frac{N}{K_N + N} \quad (8)$$

*Таким образом, расчет нитрификации через возраст ила по методике EPA полностью соответствует уравнению Моно, являясь, по сути, его арифметической трансформацией (получение концентрации субстрата, используя величину скорости роста). Однако, наш оппонент по непонятной нам причине, по-видимому, считает, что уравнение Моно – это не алгебраическое тождество, а нечто сродни логическому заключению, и его можно использовать, только «в одну сторону», вычисляя скорость через концентрацию субстрата, но никак не наоборот.*

В соответствии с результатами исследований, проведенных в США до 1993 года, расчётный возраст ила также предлагалось применять с коэффициентом, названным фактором безопасности (фактор  $SF$ ). Значения  $SF$  фактора рекомендовались в диапазоне  $1,5-3$ , в зависимости от конкретных условий и учитывали пиковые нагрузки, а также влияние таких факторов, как:

- снижение концентрации растворенного кислорода (в 80-х годах в США регулирование подачи воздуха с поддержанием концентрации кислорода не было обычной практикой);
- изменение  $pH$ ;
- поступление ингибиторов.

Расчет объема аэротенка проводится по формуле баланса массы ила в аэротенке и прироста:

$$V_a = \frac{\theta_c \cdot M_{ws}}{X_f}, \quad (9)$$

где  $V_a$  – объем аэротенка (в данном случае его аэробной части),  $\text{м}^3$ ;

$\theta_c$  – возраст ила (с учетом  $SF$ ), сутки;

$M_{ws}$  – прирост ила,  $\text{кг/сутки}$ ;

$X_f$  – доза ила,  $\text{кг/м}^3$ .

Именно в таком виде методика расчета сооружений нитрификации, разработанная в США до 1993 года, принята в китайских рекомендациях *HJ576-2010*, с использованием которых уже построено более 3000 очистных сооружений к 2017 г. [7].



Также в рассматриваемой американской методике расчета введено понятие минимального возраста ила, ниже которого нитрификация не возможна:

$$\theta_c^m = \frac{1}{\mu'_N} \quad (10)$$

В дальнейшем при развитии методик расчета эта величина становится одной из важнейших. Понятия минимального возраста ила и  $SF$  становятся основными величинами процесса нитрификации в усовершенствованной системе расчета [8], опубликованной в одном из самых популярных за рубежом отраслевых учебников, изданном Metcalf & Eddy Inc.

В этой расчетной системе минимальный возраст ила  $\theta_c^M$  и максимальную скорость утилизации субстрата находят через максимальную скорость роста нитрификаторов в заданных условиях  $\mu'_m$  по температуре,  $pH$  и концентрации кислорода (см. ниже уравнение (11)). Расчетную скорость утилизации субстрата (окисления азота) находят из принятого возраста ила с учётом минимального возраста ила и  $SF$  фактора.

Далее концентрацию азота в очищенной воде находят из уравнения Моно, связывающим максимальную и расчетную скорости нитрификации.

Для расчёта первоначально выбирают условия процесса – определяется фактор  $SF$ , исходя из характеристики нагрузки на станцию, в первую очередь, неравномерности нагрузки по гидравлике и загрязнению, значение концентрации растворенного кислорода (рекомендуется 2 мг/л), значение  $pH$  (рекомендуется в диапазоне 7,2–9 с учетом того, что 1 мг окисленного  $NH_4-N$  требует 7,14 мг щелочности, выраженной в  $CaCO_3$ ).

Далее, для определения минимального возраста ила определяется максимальная скорость роста микроорганизмов нитрификаторов  $\mu_m$  при заданных условиях среды (температура, концентрация растворенного кислорода и  $pH$ ).

$$\mu'_m = \mu_m \cdot e^{0,098(T-15)} \cdot \frac{D_0}{K_{O_2} + D_0} \cdot [1 - 0,883(7,2 - pH)], \quad (11)$$

где  $\mu'_m$  – максимальная скорость роста при заданных условиях среды;

$\mu_m$  – максимальная скорость роста при температуре 15 °С и оптимальных условиях

среды (при рекомендуемом значении константы полунасыщения по кислороду  $K_{(O_2)} = 1,3$  мг/л максимальная скорость будет достигнута при  $O_2$  более 6,5 мг/л, а при 2 мг/л – только 61% максимальной скорости). Для описания реакции в одну стадию в расчетах применяется  $\mu_m = 0,5$  сут<sup>-1</sup>;

$T$  – температура, °С;

$K_{O_2}$  – константа полунасыщения по кислороду, рекомендуется 1,3 мг/л;

$DO$  – концентрация растворенного кислорода, мг/л;

$pH$  – значение pH в аэротенке.

Затем определяется максимальная скорость утилизации субстрата  $k'$ , сутки<sup>-1</sup> (мг субстрата/мг биомассы в сутки):

$$k' = \frac{\mu'_m}{Y}, \quad (12)$$

где  $Y$  – коэффициент прироста нитрификаторов (рекомендуется 0,2 мг беззольного вещества/мг азота).

И, далее – минимальный возраст ила в аэротенке:

$$\frac{1}{\theta_c^m} = Y \cdot k' - k_d, \quad (13)$$

где  $\theta_c^M$  – минимальный возраст ила;

$k_d$  – константа скорости отмирания нитрификаторов (рекомендуется 0,05 сут<sup>-1</sup>).

Далее с использованием  $SF$ -фактора и минимального возраста ила определяется расчётный возраст ила в аэротенке  $\theta_c$ .

$$\theta_c = SF \cdot \theta_c^M \quad (14)$$

Следует обратить внимание, что скорость окисления аммонийного азота и концентрация азота в очищенной воде далее определяются в зависимости от возраста ила.

Скорость утилизации (окисления азота)  $U$  вычисляется из уравнения:

$$\frac{1}{\theta_c} = UY - k_d, \text{ откуда следует, что } U = \left( \frac{1}{\theta_c} + k_d \right) \cdot \frac{1}{Y} \quad (16)$$

То есть удельная скорость утилизации субстрата  $U$  определяется заданным возрастом ила.

Концентрация субстрата связана с рассчитанной скоростью утилизации по уравнению Моно:

$$U = \frac{k' \cdot N}{K_N + N}, \quad (17)$$

где  $k'$  – максимальная скорость утилизации субстрата;  $K_N$  – константа полунасыщения для скорости утилизации, определяемая в зависимости от температуры  $K_N = 10^{0,051 \cdot T - 1,158}$

Отсюда находим расчетную концентрацию азота в очищенной воде:

$$N = -K_N / (1 - \frac{k'}{U}) \quad (18)$$

Важно, что в данном расчете концентрация аммонийного азота в очищенной воде определяется величиной SF фактора, применённого к минимальному возрасту ила, при котором начинается процесс нитрификации.

Данный расчет хорошо показывает, как связаны возраст ила, скорости роста и скорости утилизации субстрата, и, определив возраст ила, можно определить концентрацию субстрата в биореакторе.

Далее для определения объема аэротенка используется формула аэротенка–смесителя, та же формула (2), только в других обозначениях:

$$\theta = \frac{N_0 - N}{U \cdot X}, \quad (2a)$$

где  $\theta$  – время пребывания в аэротенке, сутки;

$N_0$  – концентрация аммонийного азота в поступающей воде;

$N$  – концентрация аммонийного азота в очищенной воде (определённая ранее через возраст ила);

$U$  – Скорость утилизации (окисления азота) при расчетном возрасте ила;

$X$  – концентрация нитрифицирующей биомассы  $X = f_N \cdot X_a$ ;

$f_N$  – фракция микроорганизмов нитрификаторов в иле (как описано для предыдущего случая принимаемая в зависимости от соотношения БПК/азота по таблице);

$X_a$  – общая доза ила в аэротенке (мг/л).

То есть в данном расчете возраст ила, полученный для максимальной скорости роста в принятых условиях и возраст ила, полученный с использованием SF фактора определяют скорость окисления азота и его концентрацию в очищенной воде.

Полученная величина скорости окисления применяется именно к микроорганизмам нитрификаторам, концентрация которых рассчитывается через их фракцию в иле, *а ни в коем случае не ко всему илу (что, вразрез всей мировой практике, лежит в основе методики НИИ ВОДГЕО).*

## Рекомендации Технического справочника Дегремон

В одном из наиболее уважаемых отраслевых справочников – техническом справочнике Дегремон [4] утверждается, что возраст ила является важнейшим параметром, определяющим физиологическое состояние микроорганизмов в отсутствие или наличии нитрификации. Для гарантированной нитрификации возраст ила должен быть выше его минимального значения, которое зависит от температуры. Расчет нитрификации предлагается проводить с использованием возраста ила по графику его зависимости от температуры. При этом лишь в некоторых случаях при очистке стоков с небольшим соотношением C/N рекомендуется проверить расчет реактора по максимальной скорости нитрификации.

## Методика Хенце и соавторов

В методике, приведенной в одном из учебников Хенце и соавторов [9], расчет объема сооружения проводится с использованием математических моделей через общую массу ила, удельную скорость нитрификации и долю нитрификаторов в иле с определением фракций микроорганизмов, что позволяет существенно уточнить систему ручного расчета, приведенного в детально разобранный выше методике EPA [5].

Описывается и разъясняется понятие минимального возраста ила, уточняются зависимости максимальной скорости роста от температуры и pH и с применением математического моделирования исследуется величина SF фактора. Расчет ведется аналогично методике EPA [5]

В работе представлен вывод уравнения концентрации субстрата в реакторе, соответствующего предложенному Лоренсом и МакКарти, исходя из уравнения Моно и баланса масс реактора–смесителя. В результате получают известную формулу:

$$N_a = N_{ae} = \frac{K_{nT} \cdot (b_{AT} + 1/SRT)}{\mu_{AmT} - (b_{AT} + 1/SRT)}, \quad (19)$$



где  $N_a$  – концентрация азота аммонийного в реакторе;

$N_{ae}$  – концентрация азота аммонийного в очищенной воде (для реактора смесителя эти величины равны);

$K_{nT}$  – константа полунасыщения по аммонийному азоту при температуре T;

$\mu_{AmT}$  – максимальная скорость роста нитрификаторов при температуре T;

$b_{AT}$  – константа скорости отмирания (эндогенной респирации).

Эта зависимость является основой для расчёта процессов биологической очистки с использованием возраста ила, так как устанавливает однозначную связь между возрастом ила и концентрацией субстрата в очищенной воде. *Именно эта зависимость отрицается нашим оппонентом - соавтором методики НИИ ВОДГЕО при утверждении, что уравнение Моно можно использовать в классическом виде, не подвергая его алгебраическим преобразованиям, читать только в одну сторону. И именно это утверждение и отрицает основы мировой практики расчёта сооружений с нитрификацией.*

На основе анализа полученной зависимости, Хенце с соавторами сделали следующие выводы:

- концентрация азота в реакторе-смесителе не зависит от концентрации азота в исходной воде и коэффициента прироста, а в первую очередь, при постоянстве ферментативных констант связана с возрастом ила. При увеличении возраста ила значение в числителе формулы (19) уменьшается, а значение в знаменателе увеличивается, поэтому при увеличении возраста ила на действующих станциях концентрация азота аммонийного в очищенной воде снижается, при условии, что остальные факторы, такие как, например, кислород не лимитируют процесс (т.е. если именно концентрация аммонийного азота является ограничивающим фактором для роста);
- поддержание необходимого возраста ила, в том числе за счет поддержания необходимой концентрации иловой смеси, если это не приводит к перегрузке вторичных отстойников и обеспечивается необходимой подачей кислорода, считается наилучшей стратегией эксплуатации для достижения необходимой эффективности нитрификации. Эксплуатация сооружений с поддержанием необходимого возраста ила считается оптимальной стратегией

для сооружений с нитрификацией и удалением биогенных элементов, позволяющей активному илу адаптироваться к сезонной смене температуры и нагрузке;

- относительно параметра минимального возраста ила показано, что вследствие низких значений коэффициента полунасыщения по аммонийному азоту,  $K_{nT}$  скорость окисления аммонийного азота остается постоянной до концентрации в аэротенке-смесителе 1-2 мг/л, и далее быстро падает с дальнейшим уменьшением концентрации азота. В идеальных условиях концентрации азота в очищенной воде более 2 мг/л могут быть получены при минимальном возрасте ила. Вследствие этого, минимальный возраст ила является основной величиной, определяющей наличие процесса нитрификации. Вводится понятие лимитирующего возраста ила, при котором концентрация азота в аэротенке  $N_a$  равна концентрации азота в поступающей воде  $N_{ai}$ , т.е. процесс нитрификации прекращается.

Подставляя  $N_{ai}$  в уравнение (19) для расчета концентрации аммонийного азота в аэротенке и решая его относительно лимитирующего возраста ила  $SRT_M$ , получают выражение:

$$SRT_M = \frac{1}{\left(1 + \frac{K_{nT}}{N_{ai}}\right) \cdot \mu_{AmT} - b_{AT}}, \quad (20)$$

где  $SRT_M$  – минимальный возраст ила, выше которого возможна нитрификация. Уравнение показывает, что исходная концентрация аммонийного азота влияет на минимальный возраст ила (чем выше  $N_{ai}$ , тем больше  $SRT_M$ ). Однако отмечается, что поскольку  $K_{nT}$  на порядок меньше, чем  $N_{ai}$ , влияние  $N_{ai}$  на  $SRT_M$  минимально, и можно использовать упрощенное выражение:

$$SRT_M = \frac{1}{\mu_{AmT} - b_{AT}} \quad (20a)$$

С использованием математического моделирования в [9] показано, что при увеличении амплитуды колебаний расхода и концентраций от 0,0 (стационарное состояние) до 1,0 (100% колебание исходных величин), соотношение минимального возраста ила и принятого возраста ила для получения стабильной концентрации в очищенном стоке изменяется от 1 до 5, т.е. SF фактор существенно возрастает

при увеличении неравномерности в поступающей воде. Таким образом, даже при идеальных условиях вследствие наличия неравномерности при расчете аэротенков через возраст ила следует применять  $SF$  фактор, величина которого пропорциональна неравномерности поступления стока. С учетом сказанного выше, хотелось бы обратить внимание, что, вопреки мнению нашего оппонента, правильно определенный  $SF$  фактор – не произвольно назначенный коэффициент запаса, а объективная величина, отражающая процессы в аэротенке.

### Расчет по учебнику *Advanced Biological Treatment Process*

В другом – весьма недавно – в 2009 г. изданном в серии книг по экологическому инжинирингу учебнике по передовым процессам биологической очистки [10], так же в качестве базовых уравнений для расчета аэротенков приводятся уравнения системы Лоуренса-МакКарти. Расчет аэротенков при процессе нитрификации производится через возраст ила.

При этом здесь используется самый короткий вариант вывода уравнения для субстрата:

$$\frac{1}{\theta_x} = \frac{Y \cdot (r_s)}{X} - K_d, \quad (21)$$

где  $\theta_x$  – возраст ила;  
 $Y$  – коэффициент прироста;  
 $(r_s)$  – функция скорости удаления субстрата в реакторе от его концентрации;  
 $K_d$  – константа отмирания;  
 $X$  – концентрация ила.

Данное уравнение можно получить либо из баланса реактора, либо из уравнения удержания вида в реакторе смесителя:

$$\frac{1}{\theta_x} = \mu(S) - K_d, \quad (22)$$

где  $\mu(S)$  – скорость роста как зависимость от концентрации субстрата.

При этом отмечается, что это базовое уравнение, в котором зависимость скорости удаления субстрата от его концентрации ( $r_s$ ) может выражаться любой функцией – уравнением 1-го порядка, уравнением Моно, уравнением Холдейна и т.д.

При использовании зависимости ( $r_s$ ) по уравнению Моно получаем:

$$\frac{1}{\theta_x} = \frac{Y \cdot q_{max} \cdot S_e}{K_s + S_e} - K_d, \quad (23)$$

где  $q_{max}$  – максимальная скорость окисления субстрата;

$K_s$  – константа полунасыщения;

$S_e$  – концентрация субстрата в реакторе (для смесителя в очищенной воде).

Решая это уравнение относительно  $S_e$  получаем:

$$S_e = K_s \cdot \frac{1 + K_d \cdot \theta_x}{\theta_x \cdot (Y \cdot q_{max} - K_d) - 1} \quad (24)$$

При этом отмечается, что эффективность очистки пропорциональна возрасту ила и изменение возраста ила позволяет изменять концентрацию вещества в очищенной воде. Уравнение применяется для всех субстратов при описании их окисления кинетикой Моно.

Также одним из базовых уравнений в данном учебнике считают следующее:

$$X = \frac{\theta_x}{\theta} \cdot \frac{Y \cdot (S_0 - S_e)}{1 + K_d \cdot \theta_x}, \quad (25)$$

где  $X$  – концентрация ила;  
 $\theta$  – время пребывания в аэротенке;  
 $S_0$  – начальная концентрация субстрата.

Это выражение определяет взаимосвязь времени пребывания в аэротенке, возраста ила и дозы ила. Из этого уравнения, задавая дозу ила, вычисляется объем аэротенка или при эксплуатации, зная объем аэротенка и возраст ила, вычисляется оптимальная доза ила. При расчёте аэротенков уравнение применяется для гетеротрофов, определяющих прирост ила:

$$Y_{obs} = \frac{Y}{1 + K_d \cdot \theta_x}, \quad (26)$$

где  $Y_{obs}$  – наблюдаемый прирост ила.

Данное уравнение описывает изменения прироста ила при изменении его возраста за счет эндогенного окисления.



Так же для контроля и расчёта процессов описывается концепция минимального возраста ила и  $SF$  фактора.

В данной работе большое внимание уделяется влиянию температуры,  $pH$  процесса, а также дозы ила на кинетические константы. Показано, что  $pH$  процесса, температура и доза ила имеют совместное влияние на максимальную скорость роста и коэффициент полунасыщения.

В практике величина  $pH$ , как правило, поддерживается в диапазоне оптимума 7-7,5, а дозы ила – в диапазоне 2,5-3,5 г/л (сравнение методик). Так же в пределах оптимума 2 мг/л поддерживается концентрация растворенного кислорода. Поэтому главной зависимостью, используемой при расчёте возраста ила, является его зависимость от температуры.

## Расчет по учебнику Fundamentals of Biological Wastewater Treatment

В немецком учебнике по основам биологической очистки сточных вод [11] формула для концентрации субстрата выведена с использованием коэффициентов рециркуляции и уплотнения ила):

$$S = \frac{K_s \cdot (1 + k_d \cdot \theta)}{\theta \cdot (\mu_{max} - k_d) - 1}, \quad (27)$$

где  $S$  – концентрация субстрата;  
 $\mu_{max}$  – максимальная скорость роста;  
 $k_d$  – коэффициент отмирания;  
 $\theta$  - возраст ила.

Умножая обе части дроби на  $\theta$ , получим выражение, ранее записанное для концентрации азота в реакторе, если субстратом является азот – см. уравнение (19).

В работе также отмечается, что концентрация субстрата в реакторе-смесителе зависит (если она является лимитирующим фактором) только от возраста ила, и возраст ила является основной величиной при расчете и эксплуатации сооружений.

Мы специально показываем, что уравнение взаимосвязи концентрации субстрата как зависимости от возраста ила в разных процитированных источниках получают разными

методами. Это еще раз подчеркивает, что оно является базовым для расчётов при использовании кинетики Моно при расчете аэротенков.

Кинетическое описание процесса нитрификации в широком диапазоне величин концентрации аммонийного азота предлагается с использованием субстратного ингибирования по уравнению Холдейна, однако при этом отмечается, что концентрация азота, ингибирующая процесс, более 500 мг/л непосредственно в реакторе (т.е. для реактора-смесителя в очищенной воде). Поэтому для городских стоков следует использовать простое уравнение Моно, что и применяется в остальных представленных методиках.

В переведенном на русский язык известном учебнике Хенце и соавторов [12] в зависимости от  $pH$  и температуры ингибирование нитрификации аммиаком начинается с концентрации аммонийного азота выше 10 г/л, а второй фазы нитрификации при концентрации от 100 мг/л до 1 г/л, причем это концентрации непосредственно в аэротенке. По представленным данным НИИ ВОДГЕО ингибирование процесса нитрификации аммонийным азотом наступает при концентрациях 1-2 мг/л [2, 13]. Это противоречит всем представленным источникам и вызывает сомнения в достоверности кинетических описаний процесса, сделанных коллегами из НИИ ВОДГЕО, как минимум для городских и близких к ним стоков.

## Расчёт процесса денитрификации

Денитрификация является частным случаем хорошо изученного процесса гетеротрофного окисления органических веществ в аэротенках. При этом азот нитратов не является субстратом, а выполняет роль акцептора электронов аналогично кислороду в аэробном окислении, и 1 мг N-NO<sub>3</sub> стехиометрически аналогичен 2,86 мг O<sub>2</sub> (в расчетах часто принимается значение 2,9).

В уже рассмотренной методике EPA скорость денитрификации  $q_D$  выражается [5] через скорость окисления ХПК  $q_s$  и скорость отмирания  $b_d$ :

$$q_D = (1 - 1,42 Y_s) \cdot \frac{q_s}{2,86} + \frac{1,42}{2,86} \cdot b_d, \quad (28)$$

где  $q_D$  – скорость денитрификации;  
 $Y_s$  – коэффициент прироста гетеротрофов по ХПК;

$q_s$  – скорость окисления по ХПК;  
 $b_d$  – скорость отмирания по ХПК;  
 1,42 – удельная ХПК беззольного вещества ила, мг ХПК/мг беззольного вещества ила;  
 2,86 – стехиометрический коэффициент отношения массы кислорода к массе азота нитратов.

Способность к денитрификации присуща всем основным гетеротрофным микроорганизмам активного ила, составляющим подавляющее большинство в биоценозе. Поэтому фракцию микроорганизмов денитрификаторов в активном иле отдельно не рассчитывают.

Удельная скорость денитрификации  $q_D$  описывается в методике EPA [5] через концентрацию субстрата по БПК<sub>5</sub> и концентрацию азота аммонийного следующим уравнением:

$$q_D = \hat{q}_D \cdot \left( \frac{S}{K_S + S} \right) \cdot \left( \frac{D}{K_D + D} \right), \quad (29)$$

где  $q_D$  – удельная скорость денитрификации;  
 $\hat{q}_D$  – максимальная удельная скорость денитрификации;  
 $S$  – концентрация субстрата по БПК<sub>5</sub>;  
 $K_S$  – константа полунасыщения по субстрату;  
 $D$  – концентрация азота нитратов (денитрифицируемого азота);  
 $K_D$  – константа полунасыщения по азоту нитратов.

Величина коэффициента полунасыщения по азоту нитратов принята  $K_D = 0,2-0,5$  мг/л [9-12,14]. При этом уже 80% максимальной удельной скорости денитрификации  $q_D$  достигается при концентрации азота нитратов более  $4K_D$ , то есть 2 мг/л [9-12]. Однако авторы методики ВОДГЕО применяют в расчетах величину данного коэффициента, равную 10 мг/л, ссылаясь на особенности сточных вод в РФ. К сожалению, это свидетельствует о непонимании сути процесса: так как азот нитратов является акцептором электронов (окислителем) и его лимитирующая концентрация никаким образом не зависит от особенностей состава сточных вод.

Удельная скорость денитрификации, как процесса окисления органического субстрата, существенно зависит от типа субстрата и его концентрации [4, 9], так как используются как растворенные, так и взвешенные вещества, скорость окисления для которых различна. Оппоненты из НИИ ВОДГЕО игнорируют

данный факт, ограничиваясь только зависимостью от концентрации азота нитратов. Таким образом, они безосновательно рассматривают денитрификацию как некий несуществующий процесс преобразования нитратов в азот, не связанный с потреблением субстрата. Это столь же странно и ошибочно, как рассчитывать нитрификацию только по концентрации растворенного кислорода.

В американской методике EPA [5] для определения удельной скорости денитрификации выделяются 2 зоны денитрификации:

В 1-ой зоне денитрификации используется органическое вещество стоков:

$$SNDR_1 = 0,03 \left( \frac{F}{M_1} \right) + 0,029, \quad (30)$$

где  $SNDR_1$  – удельная скорость денитрификации, гN-NO<sub>3</sub>/г беззольного вещества ила в сутки;  
 $\frac{F}{M_1}$  – отношение массы поданного БПК<sub>5</sub> в сутки к массе ила в 1-ой зоне.

Величина скорости денитрификации в 1-ой зоне обычно находится в пределах от 0,04 до 0,15 г N-NO<sub>3</sub>/г беззольного вещества ила в сутки.

Скорость денитрификации при использовании органических веществ в сточной воде зависит от нагрузки на ил в данной зоне.

Во 2-ой зоне используется составляющая эндогенного дыхания (скорость самоокисления):

$$SNDR_2 = 0,012 \cdot \theta_C^{-0,706}, \quad (31)$$

где  $SNDR_2$  – скорость денитрификации во второй зоне г N-NO<sub>3</sub>/г беззольного вещества ила в сутки;  
 $\theta_C^{-0,706}$  – возраст ила в сутках.

Скорость денитрификации во 2-ой зоне зависит от возраста ила, влияющего на самоокисление.

Также влияние типа используемой органики на процесс денитрификации может описываться через фактор эффективности использования органического вещества  $f_{C/N}$ , показывающий, какое количество органического вещества



используется для денитрификации. Для сточных вод, характерных для РФ, следует ориентироваться на максимальные значения этого показателя. Значение  $f_{CN}$  для наиболее часто применяемых конфигураций денитрификации изменяется в диапазоне 0,3–0,6 [12]. При минимальном  $f_{CN}$  используется в основном растворенная органика, по мере роста данной величины все большая часть денитрификации происходит за счет гидролиза взвешенных веществ.

В развитие сказанного выше отметим, что наиболее точное определение скорости денитрификации как функции концентрации органического субстрата возможно в моделях, использующих фракционирование ХПК. Это связано с тем, что для денитрификации используется как растворенная легко окисляемая органика, так и взвешенные органические вещества. В моделях это описывается с использованием скорости окисления как функции концентрации растворенных органических веществ и скорости гидролиза взвешенных веществ.

Другой вариант расчета зоны денитрификации представлен в методике ATV-131 [15], которая будет рассмотрена в следующей статье.

## Расчет прироста ила

В методике EPA [5] приведены основные два варианта вычисления прироста ила.

1-й классический с использованием системы Лоуренса МакКарти (данный вариант также представлен в [10]):

$$Y_{net} = \frac{Y \cdot (\Delta S)}{(1 + b \cdot \theta_c)}, \quad (32)$$

где  $Y_{net}$  – прирост мг БВ/л обработанной сточной воды;

$Y$  – коэффициент прироста гетеротрофов;

$\Delta S = S_0 - S_e$  – количество удаленного субстрата, мг/л;

$b$  – коэффициент эндогенной респирации;

$\theta_c$  – возраст ила.

2-й вариант, разработанный группой IAWPRC (International Association on Water Pollution Research and Control) с использованием баланса по ХПК:

$$Y_{net} = X_0 + \frac{Y \cdot (\Delta S)}{(1 + b \cdot \theta_c)} \cdot (1 + (1 - f_b) \cdot (b \cdot \theta_c)), \quad (33)$$

где  $Y_{net}$  – прирост ила, мг БВ/л обработанной сточной воды;

$X_0$  – неокисляемая часть взвешенных веществ;

$Y$  – коэффициент прироста или, отнесенный к биоразлагаемой органике;

$\Delta S = S_0 - S_e$  – количество удаленного субстрата, по биоразлагаемой органике, мг/л;

$f_b$  – биоразлагаемая часть биомассы ила.

Для расчёта принималось:

При классическом подходе в единицах БПК:

$$Y = 0,7 \frac{Mg}{Mg}, \quad b = 0,06 \text{ сут}^{-1} \quad (34)$$

При классическом подходе в единицах ХПК:

$$Y = 0,5 \frac{Mg}{Mg}, \quad b = 0,1 \text{ сут}^{-1} \quad (34a)$$

При расчете по IWPRC:

$$Y = 0,45 \frac{Mg}{Mg}, \quad b = 0,25 \text{ сут}^{-1}, \quad X_0 = 0,3 \text{ от концентрации взв. вещества}, \quad f_b = 0,8$$

Оба этих подхода учитывают как прирост ила, так и процесс его самоокисления, но, во втором случае более точно учитывается неокисляемая часть взвешенных веществ и ила.

Несколько отличный от приведенного, вариант расчёта прироста описан в Техническом справочнике Дегремон [4]:

$$\Pi_p = a_m \cdot \text{БПК}_{\text{извлеченное}} - b \cdot \text{Масса}_{\text{ЛВила}}, \quad (35)$$

где  $a_m$  – коэффициент синтеза;

$b$  – коэффициент эндогенной респирации,

$\text{Масса}_{\text{ЛВила}}$  – масса беззольного (летучего) вещества ила.

Коэффициенты  $a_m$  и  $b$  по [4] определяются типом субстрата и физиологическим состоянием микроорганизмов, в первую очередь возрастом ила.

Все варианты расчета прироста ила четко показывают, что прирост ила зависит от его возраста. Это логично, так как время гидролиза взвешенных веществ и самоокисления ила равно его возрасту.

**Наш оппонент из НИИ ВОДГЕО не признает данного факта, на основании того, что прирост ила входит в одну из формул, с помощью которой вычисляется возраст ила, заявляя, что «параметр не может не учитывать самого себя»:**

$$B_u = \frac{M_u}{Pr_u}, \quad (36)$$

где  $B_u$  – возраст ила, сутки;  
 $M_u$  – масса ила в аэротенке, кг;  
 $Pr_u$  – прирост ила, кг/сутки.

Следует понимать, что возраст ила при эксплуатации станции является регулируемым параметром, который определяет биологические условия для удельного прироста. Т.е. при эксплуатации мы можем регулировать возраст, а на прирост ила можем влиять только опосредованно.

К сожалению, позиция нашего оппонента вытекает из устаревшей методологии расчета прироста ила (хорошо известная формула 60 СНиП 2.04.03-85 [16])

$$P_i = 0,8C_{cdp} + K_g L_{en}, \quad (37)$$

где  $P_i$  – прирост активного ила, мг/л;  
 $C_{cdp}$  – концентрация взвешенных веществ в сточной воде, поступающей в аэротенк, мг/л;  
 $K_g$  – коэффициент прироста, устанавливаемый в зависимости от состава (происхождения) сточных вод, для городских сточных вод равен 0,3;  
 $L_{en}$  – концентрация БПК5 в сточной воде, поступающей в аэротенк, мг/л.

Таким образом, данная формула не учитывает зависимость прироста ни от возраста ила (или, другими словами, от нагрузки на него), ни от температуры. Но, как показывает знание процесса

и анализ мировой литературы, эта позиция ошибочна, а формула недопустимо примитивна.

Если учитывать реальные закономерности биологического процесса с учетом обеспечения нитри-денитрификации, то надо, как это и делают коллеги во всем мире (что детально описано выше), вначале определять расчетный возраст ила, затем – удельный прирост ила с учетом возраста и температуры, а затем, определив массовый прирост ила  $Pr_u$  – рассчитывать массу ила в сооружении.

То есть, формула, которую имеет в виду наш оппонент, в процессе корректного проектирования (а не эксплуатационной оценки) используется по-другому. И в ней возраст ила – величина не рассчитываемая, а используемая в расчете:

$$M_u = Pr_u B_u \quad (36a)$$

Формула (36a) применима, но только не для расчета сооружений, а для эксплуатационной оценки их работы, для определения фактического возраста ила за заданный промежуток времени для конкретных сооружений, для которых известен (может быть измерен) фактический прирост.

В продолжении данной статьи мы проанализуем методику ATV-131 [15], являющуюся наиболее современным развитием вышеописанных методик «ручного» расчета процессов нитри-денитрификации.

*Продолжение читайте в №4, 2018 г.*

## Литература:

1. Д.А. Данилович, А. Н. Эпов. Сравнительный анализ методик расчета сооружений биологической очистки сточных вод с удалением азота. Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2017. № 4. С. 28–40
2. В. Н. Швецов, К. М. Морозова. Расчет сооружений биологической очистки сточных вод с удалением биогенных элементов. Водоснабжение и санитарная техника. 2013. № 11. С. 42–47
3. В. Н. Швецов. О критике методики НИИ ВОДГЕО по расчету сооружений биологической очистки сточных вод с удалением биогенных элементов. ВиСТ. 2017. № 10
4. Технический справочник по обработке воды «Дегремон». Второе издание. «Новый журнал» Санкт-Петербург. 2007.
5. Manual Nitrogen Control. U.S. Environmental Protection Agency. EPA/625/R-93/010 September 1993.
6. Sawyer, C.N. Activated sludge oxidations, V. The influence of nutrition in determining activated sludge characteristics. Sewage Works J. 1940, 12:3.
7. Technical Specifications for Anaerobic-Anoxic-Oxic Activated Sludge Process HJ 576-2010 / Китайские национальные экологические стандарты. 2010.
8. Metcalf & Eddy, Inc. Revised by George Tchobanoglous, Franklin L. Burton, H. David Stensel. Wastewater Engineering Treatment and Reuse Fourth Edition. Tata McGraw-Hill Edition 2003 Publishing Company Limited, NEW DELHI.
9. Mogens Henze, Mark C.M. van Loosdrecht, Georg A. Ekama, Damir Brdjanovic. Biological Waste Water Treatment. Principles, Modeling and Design. IWA Publishing 2008.
10. Lawrence K. Wang, Nazih K. Shamas, Yung-Tse Hung. Advanced Biological Treatment Process. Handbook of Environmental Engineering V9 Humana Press 2009.
11. Udo Wiesmann, In Su Choi, Eva-Maria Dombrowski. Fundamentals of Biological Wastewater Treatment. Copyright © 2007 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim ISBN: 978-3-527-31219-1
12. М. Хенце. Очистка сточных вод. Биологические и химические процессы/ М., Мир. – 2004
13. В. Н. Швецов, К. М. Морозова, К. В. Домнин, Е. Е. Архипова. Расчет сооружений биологической очистки сточных вод по схеме нитри-денитрификации. Водоснабжение и санитарная техника. 2012. № 7
14. Kartik Chandrana, Barth F. Smetsb. Optimizing experimental design to estimate ammonia and nitrite oxidation biokinetic parameters from batch respirograms. Water Research 39 (2005)
15. Standard ATV-DVWK-A 131E, Dimensions of Single-Stage Activated Sludge Plants. – 2000.
16. СНиП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения (не действуют).