



# Как рассчитывать аэротенки с нитри-денитрификацией: выбор методики

**Д.А. Данилович,**  
КАНД. ТЕХН. НАУК,  
РУКОВОДИТЕЛЬ ЦЕНТРА  
ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ  
И МОДЕРНИЗАЦИИ В ЖКХ  
Ассоциации «ЖКХ  
и ГОРОДСКАЯ СРЕДА»,  
ЭКСПЕРТ-ДИРЕКТОР ЖУРНАЛА  
«НДТ»

**А.Н. Эпов,**  
ГЛАВНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
СПЕЦИАЛИСТ  
ООО «Домкопстрой»

Основным мероприятием по повышению качества очистки на очистных сооружениях, построенных в прошлом веке, 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. Очень большое значение приобретает выбор правильной методики расчета.

В 2017 г. на страницах отраслевых изданий по этому вопросу завязалась важная дискуссия между сторонниками методики НИИ ВОДГЕО и авторами данной статьи, ратующих за применение международных апробированных методов расчета. Предлагаемая вниманию читателей статья подготовлена как обзор основных положений этой дискуссии.



### Почему из СНиП исчезли методики?

Технология биологической очистки с удалением азота методом нитри-денитрификации применяется в России в промышленном масштабе уже более 25 лет, однако, до настоящего времени отсутствует определенность с инженерными методиками расчета биологического удаления азота.

Старый СНиП 2.04.03-85 [1] был разработан в период, когда удаление азота при очистке городских сточных вод еще не требовалось, и вообще не содержал формул для этого процесса. Тем не менее, в конце 80-х – начале 90-х годов прошлого века процессы нитри-денитрификации уже внедрялись в практику очистки стоков на основе рекомендаций научно-исследовательских организаций.

В СНиП – Своде правил 32.13330.2012 (далее – СП 32.13330.2012) имеется ряд положений, посвященных биологическому удалению азота и фосфора. Однако, в соответствии с положениями Федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» от 30.12.2009 № 384-ФЗ СП 32.13330.2012 практически не содержит расчетных формул, оставляя возможность применения альтернативных методик расчета, в том числе, как записано

в п. 9.2.7.7 – математических моделей для расчета сооружений биологической очистки. Выбор того или иного метода расчета определяется проектировщиком (под его ответственность). Это позволяет использовать современные методы расчета, в первую очередь математическое моделирование, программы и модели для которого быстро совершенствуются. Также это позволяет разрабатывать проекты с привлечением ведущих зарубежных компаний, располагающих своими расчетными методиками.

### Рассчитывать по программам или «вручную»?

В настоящее время мы можем рекомендовать для очистных сооружений производительностью 20–50 тыс. м<sup>3</sup>/сут выполнять расчеты с использованием современных расчетных программ, привлекая для этого организации, специалисты которых хорошо владеют данными программами. Методики ручного расчета (см. ниже) более подходят для расчета сооружений на предпроектной стадии, при экспертизах, при меньшей производительности объектов, проектируемых для потоков сточной воды, которых еще не существует, например, от строящихся

микрорайонов, а также при решении эксплуатационных задач на сооружениях такого масштаба.

Разграничение вызвано тем, что основной сложностью применения математических моделей, кроме весьма и весьма важного фактора наличия как самих моделей (лицензированных!), так 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.

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, без их знания невозможно хорошее понимание математических моделей.

Следует пояснить, что можно считать математическими моделями и, так называемыми, методиками для ручных расчетов. В мировой практике такие методики именуются обычно Design Manual или Design Guide и представляют собой полный набор формул, таблиц, графиков и т.п., с оговоренной последовательностью их применения, позволяющий провести расчет процесса с использованием калькулятора или просто программного обеспечения типа расчетных таблиц Excel.

Отличие математических моделей от методик ручного расчета заключается не только в гораздо большем количестве уравнений, подробно описывающих процесс<sup>1</sup>, эти уравнения существенно сложнее. Эти модели могут рассчитывать материальный баланс процессов, а также описывать неравномерность процессов в пространстве (по длине аэротенка) и во времени, что требует использования сложных математических вычислений, недоступных для расчета вручную.

### Методика НИИ ВОДГЕО

В 2013 г. была опубликована статья [2], посвященная основным алгоритмам и обоснованию методики расчета сооружений биологической очистки сточных вод с удалением биогенных элементов, разработанной в НИИ ВОДГЕО (далее – методика НИИ ВОДГЕО) докт. техн. наук В.Н. Швецовым и канд. техн. наук К.М. Морозовой.

В этой методике время, необходимое для проведения процессов нитри- и денитрификации предлагается определять через скорости этих процессов по формуле, которая, в общем виде применительно к нитрификации может быть представлена следующим образом:

$$\text{Время нитрификации} = \frac{\text{Масса общего азота, которую необходимо нитрифицировать}}{\text{Удельная скорость нитрификации} \times \text{Концентрация беззольного вещества ила}}$$

Для определения удельной скорости окисления органического вещества, азота аммонийного или денитрификации в методике НИИ ВОДГЕО используются «кинетические константы и коэффициенты уравнений ферментативной кинетики, полученные на основании обработки данных эксплуатации действующих очистных сооружений или экспериментальных исследований на реальной сточной воде». При невозможности получить такие сведения (отсутствие реальных сточных вод) рекомендуется использовать данные аналогичных объектов. В статье, описывающей методику, приведены в графическом виде зависимости удельных скоростей процессов нитрификации, денитрификации и окисления органики от концентрации в очищенной воде, соответственно, аммонийного азота, азота нитратов и БПК. Авторы предлагают дополнить метод расчета аэротенков, заложенный в СНиП 2.04.03-85, формулами и данными по методике НИИ ВОДГЕО.

<sup>1</sup> Наиболее часто используемая одним из авторов модель ASM2d описывает 21 процесс с участием 18 веществ, потребляемых бактериями. – Примеч. авт.

## НАША КРИТИКА МЕТОДИКИ НИИ ВОДГЕО

В 2017 г. нами была опубликована статья «Сравнительный анализ методик расчета сооружений биологической очистки сточных вод с удалением азота» [3], которая содержала развернутую критику методики НИИ ВОДГЕО. В 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 рН и концентрация растворенного кислорода. Авторы методики подразумевают учет этих факторов в значениях скоростей нитрификации и денитрификации, полученных 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,

- расчет прироста активного ила без учета температуры и возраста ила весьма неточен, так как не учитывает конкретное распределение между окисляемой и идущей на прирост частями органического вещества загрязнений.

На основании изложенного был сделан вывод что рассмотренная методика не должна применяться в качестве основ-

**«Уся рота, ч-чёрт бы её  
побрал, идёт не в ногу. Один  
п-подпоручик идёт в ногу.»**

А.И. Куприн, «Поединку»



ной и тем более арбитражной при расчетах нитри-денитрификации. В качестве корректной системы расчета была названа методика, основанная на вычислении, как ключевого параметра, не скоростей процесса, а аэробного возраста ила (наиболее точно это понятие можно определить, как отношение массы ила в тех зонах аэротенков, где возможен рост нитрификаторов, к количеству ежесуточно выводимого избыточно-активного ила). Это немецкая методика расчета ATV-131, известная многим специалистам. Кстати, следует отметить, что формулы из этой методики включены в белорусский «Технический кодекс установившейся практики» [4].

## Продолжение дискуссии

В конце 2017 г. была опубликована ответная статья одного из двух авторов критиковавшейся нами методики [5], д-ра техн. наук В.Н. Швецова, в которой было выражено полное несогласие со всеми нашими аргументами. К глубокому сожалению,

уважаемый оппонент не ответил по существу ни на один из наших принципиальных аргументов. В числе приводимых контраргументов 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»».

Мы вынуждены напомнить, что классические уравнения, на которых пытались построить свою методику в НИИ ВОДГЕО, разработаны за рубежом. Автор одноименного уравнения – француз Жакоб Моно, авторами основного уравнения ферментативной кинетики, разработанного 104 года назад и явившегося основой для уравнения Моно, являются немец Леонор Михаэлис и канадка Мод Ментен. Развил эту теорию 92 года назад британец Джон Холдейн. Также мы вынуждены напомнить, что период борьбы с генетикой – «продажной девкой империализма» в нашей стране завершился около 60 лет тому назад. Прочитанный призыв к использованию «отечественных разработок», в реальности сводящихся к некорректному использованию классического уравнения, созданного за рубежом более 100 лет тому назад, вызывает глубокое сожаление и воспринимается как одно из следствий кризиса отраслевой науки, произошедшего в последние десятилетия.

Также нашим оппонентом отрицается возможность использования в моделях фракционирования биомассы по компонентам: «попытки дефрагментации активного ила на составляющие группы по видовому составу с последующим «теоретическим» синтезом для технологического расчета, на наш взгляд, непродуктивны. Дело в том, что параметры, полученные на чистой монокультуре, всегда будут существенно отличаться от параметров,

когда эта культура находится в составе сложного многокомпонентного биоценоза в условиях конкуренции за субстрат, кислород, наличия разнообразных метаболитов и т.д. Поэтому попытки точного расчета или прогноза количества клеток ... микроорганизмов на основе их параметров, закладываемых априори для чистых культур, бесперспективны» [5]. Таким образом, решительно отвергается работа десятков ведущих мировых специалистов в течение нескольких десятилетий под эгидой Всемирной водной ассоциации (IWA) по разработке моделей активного ила, положенных в основу программных продуктов, на основе которых запроектированы сотни, если не тысячи эффективно работающих сооружений в мире.

По поводу возраста ила оппонентом высказана позиция, что он «не может быть фактором, «определяющим ход и показатели процесса», это величина производная («отражающая», а не «определяющая», сумму процессов, происходящих в аэротенке...». Также выражено несогласие с необходимостью учета возраста ила при расчете прироста, на основании того, что прирост ила входит в одну из формул, с помощью которой вычисляется возраст ила: «параметр не может не учитывать самого себя».

Будучи в состоянии подвергнуть ответному критическому разбору статью нашего уважаемого оппонента абзац за абзацем, мы 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. сложно оперировать анализом положений трех опубликованных статьей данной полемики практически невозможно.

Мы решили реализовать наш ответ, прежде всего, в виде подробного рассказа о методиках расчета процесса нитри-денитрификации (в первую очередь, нитрификации) 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 расчета.

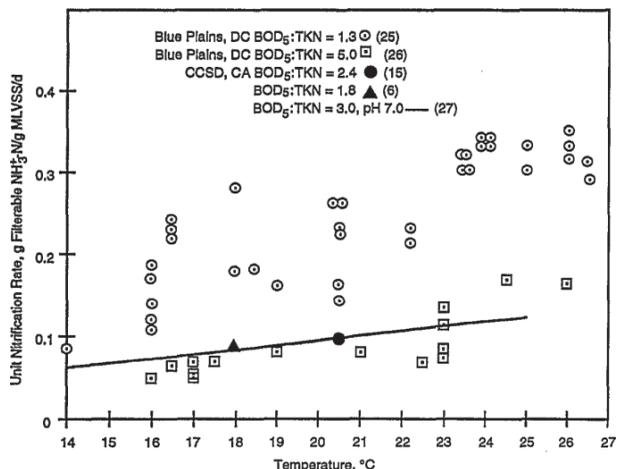
## АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ МИРОВЫХ МЕТОДИК РАСЧЕТА ПРОЦЕССА НИТРИФИКАЦИИ

Для анализа мы использовали целый ряд авторитетных в мировой профессиональной среде руководств и учебников, таких как Руководство по удалению азота Агентства по охране окружающей среды США (1993 г.) [6], регулярно переиздаваемый учебник по инжинирингу очистки сточных вод Metcalf & Eddy (2003) [7], три учебника по биологической очистке сточных вод (2007–2009 гг.), написанные ведущими мировыми авторитетами [8–10], а также известный в России переведенный на русский язык учебник М. Хенце и его коллег (2004) [11] и Технический справочник Дегремон [12]. С результатами анализа вскоре можно будет ознакомиться в журнале «ВВВ», где в настоящее время готовится состоящая из двух частей публикация, содержащая более 40 формул из вышеназванных источников<sup>2</sup>.

В данной статье, следуя редакционной политике практического издания, мы приводим основные выводы (не вдаваясь в тонкости теории процесса и формулы):

- ни одна из зарубежных методик не оперирует скоростями нитрификации, отнесенными к общей биомассе ила. Ещё в 40-е годы прошлого века в США было установлено, эта величина является переменной и зависит не только от температуры, но и от соотношения БПК<sub>5</sub> и азота [13]. Причем это различие может быть кратным даже при одинаковой температуре (см. рис.);

- одна из методик использует два варианта расчета сооружений: по возрасту ила и по скорости нитрификации. Но эту скорость относят к биомассе именно нитрификаторов, доля которых вычисляется через прирост их и гетеротрофных бактерий на сточной воде данного состава. В данной методике сделан вывод, что расчет по возрасту ила – точнее;



**Рисунок.** Зависимость скорости нитрификации от температуры и соотношения БПК<sub>5</sub> к общему азоту [13]<sup>3</sup>. По оси абсцисс – температура, °С; по оси ординат – удельная скорость нитрификации, г N-NH<sub>4</sub>/г беззольного вещества активного ила.

- остальные зарубежные методики расчета (не только описанные в вышеназванных источниках, но и, в частности, китайские рекомендации HJ 576-2010, с использованием которых уже построено более 3000 очистных сооружений к 2017 [14]), основаны на определении возраста ила как определяющего параметра, с последующим расчетом объема аэротенков, обеспечивающего поддержание данного возраста ила;

- расчет скорости денитрификации, являющейся частным случаем окисления органического вещества, производится, разумеется, с учетом его концентрации (БПК или ХПК), также как и азота нитратов, в отличие от методики НИИ ВОДГЕО, учитывающей только концентрацию нитратов;

- расчет прироста ила по проанализированным методикам осуществляется в следующей последовательности: сначала определяется расчетный возраст ила, затем – удельный прирост ила с учетом возраста

<sup>2</sup> Со всеми публикациями, краткое содержание которых описано в настоящей статье, можно ознакомиться: \_\_\_\_.

<sup>3</sup> Приведенные на рис. 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.

и температуры, а уже потом, определив массовый прирост ила, рассчитывают необходимую массу ила в сооружении.

Таким образом, проведенный анализ множества авторитетных методик расчета в сопоставлении с методикой НИИ ВОДГЕО, заставляет вспомнить известный афоризм про всю роту, идущую не в ногу.

Вторая часть публикуемого в ближайшее время анализа методик посвящена разработанной Немецкой водной ассоциацией системе расчета ATV-131 [15], хоть и не являющейся верхом совершенства, но, в отличие от методики НИИ ВОДГЕО, грамотно выведенной из базовых кинетических уравнений процессов и учитывающей целый ряд важных дополнительных факторов. Это и позволяет ей быть в Европе ведущей методикой для «ручного» расчета. Эта методика рассматривается нами как основа для разработки отечественной методики расчёта аэротенков с удалением биогенных элементов.

### **ОЦЕНКА НЕДОСТАТКОВ МЕТОДИКИ НИИ ВОДГЕО ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АНАЛИЗА РАЗВИТИЯ ОСНОВНЫХ МИРОВЫХ МЕТОДИК**

Методика НИИ ВОДГЕО учитывает влияние всех основных условий среды на основе экспериментальных данных или статистической обработки данных действующих объектов, а не на «неких абстрактных расчетах для чистых культур микроорганизмов», по выражению нашего оппонента. В результате все параметры соответствующих уравнений ферментативных реакций вычисляются статистически. В результате такие параметры, как доля микроорганизмов нитрификаторов, гидролиз взвешенных веществ, влияние возраста ила на прирост и т.д. описываются не формулами, а учитываются в коэффициентах частных применений уравнения Моно, которые определяются в основном на основании статистического анализа данных работы существующего объекта [16].

Эта особенность методики и является ее главным недостатком. Рассмотрим, что можно получить на действующих сооруже-

ниях с помощью такого подхода. Например, для того, чтобы получить на них зависимости скорости нитрификации от концентрации аммонийного азота в очищенной воде, необходимо поставить производственный эксперимент, в ходе которого должна меняться только концентрация азота, а все остальные факторы (концентрация кислорода, pH, температура, концентрация биоокисляемых органических веществ и нагрузка на ил, поступление со стоком биоокисляемых и не биоокисляемых веществ, оказывающих токсическое влияние на процесс нитрификации), должны быть на неизменном уровне. Выполнить такой эксперимент сложно даже на лабораторной установке и невозможно в условиях производственного эксперимента. И уж совсем нереально получить эти данные путем анализа данных обычной эксплуатации существующих сооружений, в том числе нескольких, как это сделали авторы методики НИИ ВОДГЕО.

Таким образом, подход, используемый в методике НИИ ВОДГЕО, коренным образом расходится с трендом расчетов процессов удаления биогенных элементов в мировой практике.

Другим вариантом использования данных эксплуатации существующих сооружений для обоснования кинетических констант мог бы являться многофакторный анализ, например, с применением векторной регрессии, как это потребовалось в работе [17] для определения констант модели по результатам лабораторных экспериментов (т.е. такой подход потребовался для обработки результатов специально спланированных для получения кинетических коэффициентов).

На наш взгляд, именно «особенности» применённого специалистами НИИ ВОДГЕО статистического анализа привели к существенному отличию результатов их описания процессов нитрификации и денитрификации, от полученных в других, в том числе в представленных здесь источниках. Во всех случаях для применения методики следует четко изложить принципы статистического анализа, которые необходимо использовать для определения коэффициентов. Их применение потребует предварительного обучения

проектировщиков использованию математических методов многофакторного анализа.

Также необходимо обосновать, по каким критериям следует выбирать объекты-аналоги, чтобы использовать для них имеющуюся в НИИ ВОДГЕО базу ферментативных коэффициентов (пока полностью не представлена). Без понятных и четко описанных в методике признаков для объектов-аналогов использование «усреднённых параметров» даст тот же результат, как известное определение средней температуры по больнице.

На наш взгляд, различные подходы в науке имеют право на существование, однако в Российской Федерации лишь несколько десятков сооружений используют процессы удаления азота [18], причем значительное их число рассчитано с применением «сомнительных», с точки зрения НИИ ВОДГЕО, методик или математического моделирования. Разрабатывать отечественную методику расчёта, конечно важно, однако, мы уверены, что для этого необходимо максимально использовать мировой опыт расчёта данных процессов, с использованием которого построено во много сотен раз больше сооружений, чем в нашей стране, а не отрицать его.

Сама методика НИИ ВОДГЕО, в которой многие процессы и явления описываются не уравнениями, а статистически учитываются в коэффициентах, на наш взгляд, не является примером использования ферментативной кинетики, а скорее использованием уравнений, по форме совпадающих с уравнениями ферментативной кинетики, для эмпирического описания процессов. Результаты расчетов по ней будут совпадать с действительностью только в условиях, близких к использованным для сбора статистического материала, и не будут давать адекватного прогноза при их изменении.

В целом не отрицая возможности применения подходов, используемых в НИИ ВОДГЕО для исследования процессов, мы категорически возражаем против использования данной методики, как арбитражной, и не рекомендуем пользоваться ею при проектировании ввиду описанных недостатков, вытекающих из ее основных принципов.

Более того, современные подходы к проектированию, закрепленные в законодательстве, отрицают само понятие «арбитражной методики», оставляя возможность для использования различных методологий расчета. По нашему мнению, ни одна из методик расчета сооружений биологической очистки не должна включаться в Свод правил или в обязательное приложение к нему. ●

## ЛИТЕРАТУРА

1. СНиП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения (не действуют).
2. Швецов В.Н., Морозова К.М. Расчет сооружений биологической очистки сточных вод с удалением биогенных элементов. Водоснабжение и санитарная техника. 2013. № 11. С. 42–47.
3. Данилович Д.А., Эпов А.Н. Сравнительный анализ методик расчета сооружений биологической очистки сточных вод с удалением азота. Водочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2017. № 4. С. 28–40.
4. «Технический кодекс установившейся практики» ТКП 45-4.01-202-2010 (02250) Очистные сооружения сточных вод. Строительные нормы проектирования. Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. Минск, 2011.
5. Швецов В.Н. О критике методики НИИ ВОДГЕО по расчету сооружений биологической очистки сточных вод с удалением биогенных элементов. Водоснабжение и санитарная техника. 2017. № 10.
6. Manual Nitrogen Control. U.S. Environmental Protection Agency. EPA/625/R-93/010 September 1993.
7. 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.
8. Mogens Henze, Mark C.M. van Loosdrecht, Georg A. Ekama, Damir Brdjanovic. Biological Waste Water Treatment. Principles, Modeling and Design. IWA Publishing 2008.
9. Lawrence K. Wang, Nazih K. Shamas, Yung-Tse Hung. Advanced Biological Treatment Process. Handbook of Environmental Engineering V9 Humana Press 2009.
10. Udo Wiesmann, In Su Choi, Eva-Maria Dombrowski. Fundamentals of Biological Wastewater Treatment. © 2007 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim ISBN: 978-3-527-31219-1.
11. Хенце М. Очистка сточных вод. Биологические и химические процессы / М., Мир. – 2004
12. Технический справочник по обработке воды «Дегремон». Второе издание. «Новый журнал» Санкт-Петербург. 2007.
13. Sawyer, C.N. Activated sludge oxidations, V. The influence of nutrition in determining activated sludge characteristics. Sewage Works J. 1940, 12:3.
14. Technical Specifications for Anaerobic-Anoxic-Oxic Activated Sludge Process HJ 576–2010 / Китайские национальные экологические стандарты. 2010.
15. Standard ATV-DVWK-A 131E, Dimensions of Single-Stage Activated Sludge Plants. – 2000.
16. 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.
17. Kartik Chandrana, Barth F. Smetsb. Optimizing experimental design to estimate ammonia and nitrite oxidation biokinetic parameters from batch respirograms. Water Research 39 (2005).
18. Данилович Д.А., Эпов А.Н., Канунникова М.А. Анализ данных работы очистных сооружений российских городов – основа для технологического нормирования. 2015. Наилучшие Доступные Технологии водоснабжения и водоотведения. 2015. № 3–4.