

УДК 628.35

О критике методики НИИ ВОДГЕО по расчету сооружений биологической очистки сточных вод с удалением биогенных элементов

В. Н. ШВЕЦОВ*

* Швецов Валерий Николаевич, доктор технических наук, заведующий Экспертно-консультационным центром, АО «НИИ ВОДГЕО»
119435, Россия, Москва, Б. Саввинский пер., 9, стр. 3, тел.: (499) 245-96-33, e-mail: post@vstmag.ru

Приведен анализ критических замечаний, опубликованных в статье кандидата технических наук Д. А. Даниловича и инженера А. Н. Эпова «Сравнительный анализ методик расчета сооружений биологической очистки сточных вод с удалением азота», где оппоненты утверждают следующее: методика НИИ ВОДГЕО является «ручной» и упрощенной, не относится к математическим моделям; параметр удельная скорость нитрификации неприменим для расчетов; отсутствует учет влияния температуры и других факторов; «упрощенные» уравнения ферментативной кинетики неприменимы к процессам нитри-денитрификации ввиду недопустимых искажений, вызванных влиянием факторов, которые эти уравнения не учитывают; возраст ила определяет качество очищенной воды независимо от содержания загрязнений в поступающей сточной воде; при расчете прироста ила необходимо использовать возраст ила; остаточная концентрация вещества (в очищенной воде) не зависит от его исходной концентрации; расчет аэротенков необходимо проводить на основе возраста ила. На основе детального анализа тезисов и утверждений оппонентов показана их ошибочность и бездоказательность. Доказано, что ни одного существенного факта, порочащего методику НИИ ВОДГЕО, в статье не приведено, а выводы авторов не обоснованы и надуманы. Сделано заключение, что наличие надежного и проверенного национального метода расчета

обеспечит контроль за необоснованным использованием неадекватных, непроверенных методов расчета, исключит неоправданное завышение стоимости строительства и реконструкции, бесконтрольное привлечение непроверенных иностранных разработок в проекты, снизит уровень коррупции в этой области, позволит грамотно реализовать разрабатываемые наилучшие доступные технологии в отечественную практику. Отмечается, что с тех пор метод расчета, заложенный в СНиП 2.04.03-85, является единственной возможностью для специалистов рассчитывать и контролировать сооружения биологической очистки городских и производственных сточных вод. Поэтому совершенствование и актуализация универсального, научно обоснованного и проверенного на практике отечественного метода расчета сооружений биологической очистки городских и производственных сточных вод в части удаления биогенных элементов является актуальной и неотложной задачей. Обращено внимание на необходимость срочного восстановления компетенций специалистов, возрождения российской научной школы на основе огромного научного и практического задела, созданного нашими предшественниками.

Ключевые слова: сточные воды, биологическая очистка, удаление биогенных элементов, нитрификация, денитрификация, возраст активного ила, расчет сооружений.

В журнале «Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение» (№ 4, 2017) опубликована статья кандидата технических наук Д. А. Даниловича и инженера А. Н. Эпова «Сравнительный анализ методик расчета сооружений биологической очистки сточных вод с удалением азота» [1], в которой справедливо отмечается, что в РФ сложилась неудовлетворительная ситуация с используемыми алгоритмами расчета сооружений

биологической очистки с удалением азота и фосфора. Авторы сообщают, что статья посвящена «аргументированной» критике методики расчета, разработанной специалистами НИИ ВОДГЕО со ссылкой на статью Швецова В. Н., Морозовой К. М. «Расчет сооружений биологической очистки сточных вод с удалением биогенных элементов» [2]. По результатам своего анализа авторы делают вывод, что «Упрощенная кинети-

ческая методика расчета азротенков с нитри-денитрификацией, основанная на использовании скоростей процессов, **не учитывает множество принципиально важных факторов и не должна применяться**. Взамен коллеги предлагают использовать зарубежную методику расчета, «основанную на возрасте ила», который, как считают авторы, является важнейшим фактором, «определяющим состав и свойства биомассы», взяв за основу расчет по методике ATV-131 (Германия) [3].

Для изложения своих аргументов авторы выбрали своеобразный «жанр»: «... статья рассчитана на широкого читателя, **не погруженного в теорию процессов биологической очистки, но занимающегося проектированием таких сооружений...**» (весьма странный контингент специалистов!) «... Поэтому мы постарались в статье обойтись практически без формул, и изложить все максимально простым языком». Далее авторы отмечают: «УКМ является развитием зарекомендовавшей себя, хорошо проверенной и научно обоснованной методики расчета азротенков на удаление органических загрязнений (БПК), разработанной специалистами «НИИ ВОДГЕО», содержащейся в СНиП 2.04.03-85, связывающей между собой характеристики исходной и очищенной воды, концентрацию растворенного кислорода, концентрацию активного ила и его прирост»*.

Оппоненты странным образом вообще не относят к математическим моделям методику НИИ ВОДГЕО (так же как и методику ATV-131). На с. 27 статьи [1] (вторая колонка) утверждается: «Из методик расчета сооружений биологической очистки сточных вод с удалением биогенных элементов, используемых в России, **не относящихся к математическим моделям, следует выделить: упрощенную кинетическую методику (далее – УКМ), разработанную в ОАО «ВНИИ ВОДГЕО» [4] (далее будут даны аргументы, объясняющие это данное нами определение методики); методику ATV-DVWK-A 131E, 2000 [5]...** Это одна из наиболее применяемых в Европейских странах методик расчета, разработанная немецким отраслевым инженерным обществом. В России используется в виде неофициальных неавторизованных переводов различного качества». К сожалению, понять систему взглядов авторов на вопросы математического моделирования нам не удалось. Классические определения понятия «математическая модель» не соответствуют

данному авторами категорированию методик расчета, а каких-либо аргументов, обосновывающих их критерии при отнесении тех или иных методик к «математическим моделям» или «не к математическим моделям», или (новый термин) «ручным методикам», в статье не приведено.

Следует отметить, что в статье [2] речь не идет о математической модели (она лишь упоминается), а детально описывается разработанная методика и приводится алгоритм расчета сооружений биологической очистки с удалением биогенных элементов.

Даже при самом поверхностном ознакомлении с рассматриваемой публикацией [2] трудно было не заметить, что в основе методики НИИ ВОДГЕО, так же как и всех моделей ASM, лежат одни и те же фундаментальные уравнения ферментативной кинетики, т. е. зависимости скорости потребления субстрата (в нашем случае – скорости удаления загрязняющего вещества, трансформации соединений азота) от их концентраций и ряда констант, характерных для данного процесса и данного типа биомассы. Методика НИИ ВОДГЕО учитывает виды и свойства загрязнений сточных вод, используемых бактериями как субстраты для роста (включая фазовое состояние органических загрязнений и процессы их гидролиза), влияние всех основных условий среды (концентрация растворенного кислорода, рН, щелочность, температура), равновесные концентрации различных функциональных групп биомассы (гетеротрофы, нитрификаторы и др.), формирующиеся в активном иле **на основе экспериментальных данных или статистической обработки данных действующих объектов, а не на неких абстрактных расчетах для чистых культур микроорганизмов.**

Статья [1] содержит ряд положений и выводы, которые невозможно оставить без комментариев.

В чем же коллеги усматривают основные пороки методики НИИ ВОДГЕО?

1. На с. 28 (первая колонка) [1] авторы пытаются доказать неприемлемость использования показателя удельной скорости нитрификации (УСН) (отнесенной к беззольному веществу активного ила): «... рассмотрим, насколько такой параметр, как УСН активным илом, **вообще может использоваться при расчете процесса**». Далее идут пространные, но фрагментарные рассуждения на общеизвестные темы об особенностях процесса нитрификации и структуре активного ила, в котором лишь незначительная часть является автотрофами-нитрификаторами, не использующими органический углерод, сообщается о респиромет-

* Здесь и далее при цитировании орфография и пунктуация авторов сохранены.

рическом тесте определения скорости нитрификации. Приводится общеизвестный факт, что скорость нитрификации в вытеснителе переменна по его длине, даются общие рассуждения с некими примерами того, в каких случаях «в грамм БВ ила поместится» в разы больше или меньше нитрификаторов. На с. 28 (первая колонка, первый абзац) указано: «В основе УКМ применительно к процессам нитри- и денитрификации лежит использование величин скоростей этих процессов, которые определяются по формуле...» и почему-то приведена формула для определения вместимости (времени пребывания) зоны нитрификации, не имеющая никакого отношения к сказанному, в то время как в методике НИИ ВОДГЕО [2] удельная скорость нитрификации определяется по уравнению ферментативной кинетики (3).

Для обоснования «неприемлемости» использования показателя удельной скорости нитрификации приводится ряд «примеров», далеких от жизни, весьма грубо, на бытовом уровне иллюстрирующих некие граничные, аварийные ситуации. На с. 29 (третья колонка) приведен пример, в котором в работающем аэротенке состав исходной воды (по содержанию азота или БПК) вдруг меняется в разы. Основываясь на упомянутых примерах (не понятно, каким образом рассчитанных в «разах» и процентах, без обозначения режима и степени очистки), авторы сообщают, что «величина УСН может изменяться до 5 раз при почти неизменном качестве очистки в зависимости от состава сточных вод, даже относящихся к одному типу», или «... Таким образом, величина УСН даже при прочих равных условиях может, как меняться в зависимости от состава сточных вод, так и демонстрировать нечувствительность к серьезнейшим изменениям в процессе очистки... Если это снижение окажется ниже критического возраста для нитрификаторов, то скорость оборота биомассы превысит скорость роста нитрификаторов...» (с. 30, первая колонка, последний абзац). Коллеги почему-то называют возраст ила (сут) «скоростью оборота биомассы» (размерность не понятна!), вместо «времени оборота биомассы» (сут), сравнивая ее со скоростью роста биомассы (г/сут). И далее (с. 30, вторая колонка): «... приведенные выше «несложные» рассуждения и расчеты показывают, что применительно к процессу нитрификации городских сточных вод показатель удельной скорости окисления, который надежно характеризует удаление БПК, оказывается, во-первых, неэффективным при «ручных» методиках расчета, и, во-вторых, недостаточным, так как должен использоваться вместе с определением возраста ила, как важного

параметра, обеспечивающего саму возможность глубокой нитрификации».

Приводимые «несложные» примеры не корректны применительно к проектированию очистных сооружений, поскольку коллеги пытаются сопоставить несравнимые ситуации. Каждый из приведенных вариантов не может быть переходом одного и того же сооружения «в процессе очистки» из одного стационарного состояния в другое, поскольку таких кардинальных изменений состава сточных вод в принципе быть не может (за исключением маловероятных краткосрочных залповых сбросов, что является аварийной ситуацией). Каждый из приведенных вариантов может быть только самостоятельным расчетным случаем при соответствующем, статистически устойчивом составе сточной воды, поскольку режимы работы сооружений и их объемы будут кардинально различны и несопоставимы. Для каждого случая будут свои объемы сооружений, свой видовой состав активного ила, свои удельные и абсолютные скорости роста и окисления. Поэтому все эти примитивные примеры не могут быть доказательством ни «неэффективности», ни «недостаточности» УСН. Связь с некими «ручными» методиками вообще не просматривается!

В расчетах по методике НИИ ВОДГЕО в процессе проектирования всегда (и это подчеркивается в статье [2]) самым тщательным образом определяется состав исходной воды с вероятностью не менее 85%, что также подчеркивается в статье. В соответствии с методикой НИИ ВОДГЕО, расчет всегда производится под конкретный, статистически обоснованный состав сточных вод! И именно для этого состава (соответственно, структуры активного ила) в методике определяются параметры уравнений, в том числе и уравнения (3) для расчета удельной скорости нитрификации на заданную степень очистки.

Разъясняя «правильное понимание смысла понятия УСН», в своих рассуждениях и примерах коллеги сильно заблуждаются. Например, на с. 29 (вторая колонка, первый абзац) сказано: «Очевидно, что значение УСН для ила, очищающих сток с БПК₅ 400 мг/л и азотом 40 мг/л будет в два раза ниже, чем для ила, «работающего» на стоке 200 мг/л и азотом 40 мг/л, потому что в первом случае в грамм БВ ила «поместится» в два раза меньше нитрификаторов».

Полагая, что коллеги сопоставляют два нормально работающих аэротенка, можно констатировать, что в этой фразе они допускают три принципиальные ошибки.

Во-первых, оппоненты утверждают, что формирование фракционного (видового) состава

биомассы активного ила происходит **прямо пропорционально исходным концентрациям загрязнений**: «... значение УСН ... будет в два раза ниже, ... потому что ... в грамм БВ ила «поместится» в два раза меньше нитрификаторов».

На самом деле, в соответствии с уравнением Моно, фракционный состав биомассы формируется **не в зависимости от исходных концентраций** (которые в основном определяют вместимость сооружения), а **главным образом** от скоростей роста (или окисления) соответствующих видов микроорганизмов. Эти скорости задаются требуемой степенью очистки.

Во-вторых, **подменяют активность (УСН) нитрификаторов их количеством**. На самом деле, в соответствии с закономерностями ферментативной кинетики (достаточно взглянуть на уравнение (3) или рис. 2 в [2]), при том же количестве нитрификаторов в активном иле их реальная активность (УСН) **определяется исключительно концентрацией азота аммонийного в очищенной воде** (степенью очистки).

В действительности значение УСН «... будет ниже (или выше), ... не потому, что ... в грамм БВ ила «поместится» в два раза меньше (или больше) нитрификаторов», а наоборот, фракционный состав ила формируется **в зависимости от скоростей нитрификации** (и других загрязнений), определяемых заданной степенью очистки.

В-третьих, **расчет сооружений биологической очистки по показателю БПК₅ не корректен** [2]. Показатель БПК₅ не является мерой содержания в сточной воде биологически окисляемых органических загрязнений, а соответствует только некоторой доле биологически окисляемых органических веществ и составляет всего 0,59–0,71% от БПК_{полн}, соответственно, ошибка в объемах сооружений составит 1,4–1,7 раз. Только для очищенной воды показатель БПК₅ может быть близок к БПК_{полн}.

Ориентировочные расчеты по методике НИИ ВОДГЕО показывают, что в первом случае УСН будет значительно ниже, чем в 2 раза, поскольку здесь лимитирующим показателем будет не нитрификация, а снижение БПК, и время обработки (объемы сооружений) будет в разы больше, чем это требовалось бы для нитрификации.

Таким образом, то, что оппонентами трактуется, как «неэффективность» и «недостаточность» УСН, представляет собой устойчивую взаимосвязь УСН с концентрацией субстрата в очищенной воде и **однозначно показывает, какое количество азота аммонийного в единицу времени способна окислить единица массы активного ила данного состава до нитритов и нитратов, мг/(г·сут),**

при заданной степени очистки по азоту аммонийному. Именно поэтому УСН является единственным надежным и напрямую измеряемым параметром для расчета объема нитрификатора.

Общие рассуждения и «несложные» примеры относительно фракционного состава активного ила, не применимые к условиям расчета реальных очистных сооружений, только запутывают читателя, «не погруженного в теорию процессов биологической очистки...», и не имеют отношения к методике НИИ ВОДГЕО, поскольку при проектировании рассчитываются конструктивные параметры и технологические режимы очистных сооружений, **обусловленные статистически обоснованными условиями процесса** (температура, состав сточных вод, расходы и др.). Именно **зависимость удельной скорости нитрификации от концентрации азота аммонийного в очищенной воде описывается уравнением (3) методики в статье [2]**. Сколько-нибудь значимые аргументы, обосновывающие «неэффективность» или «недостаточность» параметра удельной скорости нитрификации, в статье [1] отсутствуют. Что касается необходимости использовать УСН «вместе с определением возраста ила», поясним ниже.

Далее оппоненты обращаются за помощью к «авторитетам», сообщая, что «... **в отличие от рассматриваемой УKM** (методика ВОДГЕО), в ASM как раз рассчитывается и учитывается биомасса именно нитрификаторов, и кинетические уравнения рассчитывают УСН на основе констант процесса, характерных для чистой культуры нитрификаторов. Модель также учитывает все вышеупомянутые параметры среды, влияющие на рост нитрификаторов, и, **разумеется, возраст ила**». После чего, наконец, сообщают, что «... **проблема упрощенной кинетической методики не в некорректности ее уравнений, а в их неполноте по учету факторов и отнесении их результатов ко всему БВ активного ила, что и объясняет данное ей определение**».

То есть в качестве аргумента «несостоятельности» методики НИИ ВОДГЕО авторы используют то, что в ней ряд положений рассматривается **не так**, как в «правильной» модели ASM. Заметим, что «не так» вовсе не означает, что неправильно.

При этом коллеги тут же «дезаувируют» то, на что ссылались в качестве «правильной» модели, следующим текстом (с. 33, вторая колонка): «... **являются ли сложные расчетные модели (ASM-2 состоит из 21-го основного уравнения) безальтернативными для применения в практике проектирования?...** Кроме очевидного факта, что это достаточно сложные (и дорогостоящие)

программные продукты, требующие для работы с ними достаточно глубокого понимания сути процессов и структуры этих программ, существует ряд объективных ситуаций, когда их применение малоэффективно. Это определяется тем, что для получения достаточно точных результатов расчетов необходимо верифицировать для местных условий целый ряд коэффициентов, используемых моделями...». И далее: «**На практике неоднократно доказано, что использование самых совершенных расчетных программ без верификации коэффициентов, с осредненными их значениями, никак не точнее, чем расчет по методике, лишенной вышеперечисленных недостатков**». По мнению одного из специалистов, работающего с такой программой, «... **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 [11]**».

Как говорится, комментарии излишни!

Теперь надлежит пояснить следующее. В основу методики НИИ ВОДГЕО заложен принцип необходимой достаточности. Поэтому активный ил рассматривается как комплексная субстанция, обладающая рядом определенных свойств: способностью окислять органические вещества, осуществлять процессы нитрификации и денитрификации, окислять нефтепродукты и СПАВ, накапливать фосфаты, а в определенных условиях накапливать их в повышенных количествах, изменять свою биомассу и ее фракционный состав при осуществлении этих процессов. В методике НИИ ВОДГЕО **все параметры соответствующих уравнений ферментативных реакций вычисляются статистически** при обследовании существующих сооружений при их реконструкции, определяются в лабораторном эксперименте или принимаются на основе усредненных статистических параметров действующих объектов-аналогов при проектировании новых объектов. Все методики обработки данных разработаны [4–6].

С позиций методики расчета важен не конкретный видовой состав ила (он нужен для научных оценок), а его технологические характеристики (какие и как он выполняет технологические функции). При этом не важно, как именно назы-

ваются микроорганизмы, осуществляющие эти процессы, сколько их «поместится» в активном иле, какова их кинетика в чистой культуре.

Это наиболее простой, практичный и верный подход. Попытки дефрагментации активного ила на составляющие группы по видовому составу с последующим «теоретическим» синтезом для технологического расчета, на наш взгляд, не продуктивны (не отрицая огромной важности изучения микробиологии и биохимии активных илов для понимания существа процессов). Это подтверждается нашим опытом и многими литературными источниками (в том числе и коллегами в приведенной выше цитате). 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 нитрификаторов, фосфораккумулирующих организмов или других видов микроорганизмов на основе их параметров, закладываемых априори для чистых культур, бесперспективны.

То же относится и к попыткам заменить БПК_{полн} на ХПК с детальной и крайне трудоемкой дефрагментацией этого параметра на составляющие, которая во всех случаях на практике оказывается неадекватной реальности и корректируется (вернее, элементарно подгоняется задним числом) под реальный объект в процессе так называемой «калибровки», что и подтверждает один из авторов [7]. Поэтому детальные модели типа ASM практически не имеют преимуществ по точности, а, скорее, проигрывают по стоимости и сложности подготовки данных по сравнению с подходом НИИ ВОДГЕО, хотя они, безусловно, превосходят расчеты по СНиП в процессе динамической оптимизации построенных сооружений и их автоматизации!

2. Об отсутствии учета влияния температуры и других факторов в методике НИИ ВОДГЕО (с. 30, вторая колонка). Видимо, оппоненты не заметили или не обратили внимание на текст в статьях [2; 8; 9], в других публикациях, например, в недавно вышедшей монографии [6], написанной с участием автора настоящей статьи, где подробно описана методика обработки данных, методика расчета сооружений биологической очистки, сообщается об исследованиях влияния температуры, рН и других факторов, имеющих значение для **конкретных видов сточных вод**. В критикуемой статье [2] сказано: «Обоснование

адекватных исходных данных **является одним из ключевых моментов** при проектировании и расчете стабильно и надежно работающих сооружений. При обосновании исходных данных для расчета необходимо выполнять статистический анализ параметров сточной воды, поступающей на очистные сооружения за последние 2–3 года. Результаты статистической обработки представляются в виде гистограмм частоты вариаций и диаграмм Парето, которые позволяют установить частоту и диапазон вариации, а также определить расчетные концентрации загрязнений при требуемой (85–90%) обеспеченности для стабильной работы сооружений. **Аналогичные гистограммы следует строить для всех основных расчетных показателей качественного состава сточной воды, в том числе соединений азота и фосфора**». Тем самым методика НИИ ВОДГЕО путем статистического обоснования адекватных исходных данных **по определению не может не учитывать** влияние температуры и любых других факторов, **влияющих или могущих влиять на расчетные параметры** через значения соответствующих констант в уравнениях ферментативной кинетики. В случаях, когда температура действительно может быть критическим фактором, температурные зависимости исследуются более детально [5; 6]. Методика предусматривает учет температуры уравнением Ван-Гоффа.

3. График на рис. 2 [2], приведенный в качестве одного из примеров, почему-то вызвал у оппонентов много вопросов, в частности *«можно ли вообще получить данные такой точности... Ведь, кроме погрешности определения, на концентрацию аммонийного азота на выходе значительно (в рассматриваемом диапазоне!) влияет неравномерность входной нагрузки по азоту»*. Странность вопроса состоит в том, что на графике не приведены ни экспериментальные точки, ни данные о точности аппроксимации. Поэтому не понятно, о какой «точности» говорят коллеги. Поскольку вся методика реализуется в программе Excel, точность аппроксимации оценивалась коэффициентом достоверности аппроксимации (R^2), который показывает степень соответствия трендовой модели исходным данным. Один из коллег (А. Н. Эпов) сам же и отвечает на этот вопрос в совместной статье с В. И. Баженовым [7] *«Назначение величины расчетных нагрузок определяется при статистической обработке данных, полученных на объекте исследований по общепринятым методикам...»*.

Далее, в качестве способа, якобы позволяющего *«получить точное значение УСН на промышленных сооружениях...»* (с. 31, первая колонка,

третий абзац), авторы предлагают делать это на основе разовых среднесуточных проб на входе и выходе очистных сооружений. Метод **разовых проб** не приемлем для получения расчетных данных при проектировании, поскольку из-за высокой variability параметров сточных вод по составу и расходам в любой другой момент времени результаты будут существенно различаться. Он может быть полезен только при калибровке модели в режиме онлайн. Дальнейшие умозаключения авторов по поводу субстратного торможения аммонием не имеют отношения к графике. Отметим лишь, что имеет смысл посмотреть наши публикации, где приведены десятки аналогичных кривых, полученных в результате статистической обработки и описываемых уравнением (3) с большей или меньшей степенью торможения субстратом, например в работах [6; 8].

4. Графики на рис. 3, а и б [1]. На с. 32 (первая колонка) отмечено: *«Такой вид графика (3а) существенно отличается от аналогичного (3б), приведенного для БПК. А ведь процесс денитрификации, как известно, по сути, является тем же окислением БПК, причем теми же микроорганизмами, только не кислородом, а нитратами»*. И далее: *«Показано, что лимитирующие процесс концентрации азота нитратов находятся в гораздо более низком диапазоне 0,8–2 мг/л ($K_{SNO_3} = 0,2–0,5$ мг/л) [9], чем величина, выведенная из графика на рис. 3а, равная 10 мг/л. Не ставя под сомнение данные, использованные при построении данного графика, можно, как и для графика на рис. 1, предложить иное, некинетическое, объяснение его виду»*. Отметим, что графики на рис. 3, а и б [1] отражают кинетику абсолютно разных, хотя и связанных процессов, и построены в разной системе координат. График на рис. 3, а показывает зависимость удельной скорости восстановления окисленных форм азота, мгN/(г·ч), **от содержания нитратов и нитритов, мгN/л**, а график на рис. 3, б – зависимость удельной скорости окисления (БПК) **от содержания органического вещества**. Не понятно, как коллеги сравнивали «по виду» не сопоставимые по формату графики.

Также не понятно, чем так «смutil» коллег «вид» графика на рис. 3, а, что они решили предложить *«иное, некинетическое объяснение»* (объяснение чего?) в форме пространственных рассуждений, не имеющих отношения к данному графику. Хотя, безусловно, они имеют на это право!

Ссылка оппонентов по поводу лимитирующих концентраций азота нитратов на данные иностранных источников, относящихся **к другим типам сточных вод**, характерных для зарубежных

стран и не характерных для РФ, при неизвестных методах расчета этих значений, конфигурациях процессов и соотношений C/N , не может служить ориентиром для оценки или сопоставления полученных нами статистически обоснованных, рассчитанных с учетом всех форм азота и органических веществ данных по кинетике процесса денитрификации ряда реальных городских сточных вод. Если бы коллеги в процессе написания статьи, кроме цитирования монографии Хенце [10], нашли время ознакомиться со статьей К. М. Морозовой [8], они бы обнаружили, что скорости денитрификации (так же, как и нитрификации) даже для городских сточных вод могут различаться в разы, не говоря уже о производственных сточных водах.

Далее, после общих рассуждений следует текст: «Естественно, в таких ситуациях (а они могут формироваться, в том числе, в результате недогрузки аэротанков), УСД будет существенно ниже, при достигаемых малых величинах нитратов. **Что мы и видим** на обсуждаемом графике За...».

О каких «ситуациях», имеющих какое-либо отношение к этому графику (или к Методике вообще) говорят коллеги и что такое они «увидели» на обсуждаемом графике? О том, что при снижении концентрации субстрата (нитратов) или содержания органических веществ будет снижаться и УСД, давно всем известно из теории ферментативной кинетики (см. уравнение (4) в [2]). Какое отношение эти общие рассуждения имеют к графику рис. 3, а?

И далее следует странный вывод: «Таким образом, **опять можно говорить о нарушенной причинно-следственной связи: не потому низкая УСД, что процесс тормозится низкой концентрацией нитратов, а наоборот: низкая концентрация нитратов в принципе достижима благодаря низкой нагрузке на сооружение, обеспечивающей возможность для, в том числе эндогенного дыхания, и, разумеется, при низком значении УСД**». Из предыдущих рассуждений невозможно понять, о «нарушении» какой «причинно-следственной связи», о каком «торможении низкой концентрацией нитратов» рассуждают коллеги? На графике вообще отсутствует какое-либо торможение. Там представлена реальная зависимость скорости денитрификации от концентрации окисленных форм азота в нормально работающих сооружениях! Не понятно, какое отношение все эти импровизации уважаемых оппонентов имеют к графику рис. 3, а?

И наконец (с. 33, первая колонка, второй абзац снизу): после общих рассуждений о свойствах субстрата, процессах гидролиза, оптималь-

ных соотношениях C/N , «внекинетических» факторах, и вообще о работе очистных сооружений с денитрификацией и «не ставя под сомнение данные, использованные при построении данного графика...», коллеги делают странный вывод, что «... оперирование понятием УСД в отрыве от соотношения C/N и конфигурации процесса, определяющей $f_{C/N}$, практически лишено смысла». Абсолютно непонятна связь приведенного текста и вывода с графиком на рис. 3, а. Какое отношение к этому конкретному графику, кроме ликвидации безграмотности «не погруженного в теорию» читателя, имеют общие рассуждения, предшествующие этому выводу? На графике представлена расчетная, статистически обоснованная зависимость, объективно отражающая режимы работы и конфигурацию процесса очистки за длительный период времени. Из графика рис. 3, а явно видно отсутствие лимитирования процесса денитрификации органическим субстратом! О каком, якобы «лишенном практического смысла оперировании понятием УСД в отрыве от соотношения C/N и конфигурации процесса», говорят коллеги?

И далее (с. 33, первая колонка) авторы делают следующий вывод: «Таким образом, проделанный анализ показал неприменимость упрощенных уравнений ферментативной кинетики и основанных на них моделей ... к процессам нитри-денитрификации ввиду недопустимых искажений, вызванных влиянием факторов, которые эти уравнения не учитывают». Основанием для этого вывода, по видимому, является текст статьи, изложенный на с. 31 (вторая колонка, первый абзац) и с. 33 (первая колонка, второй абзац), рассмотренный выше. Из текста не удалось понять, какие же аргументы привели авторов к таким выводам? О каких якобы «недопустимых искажениях» идет речь? Какие факторы, якобы не учитываемые «этими упрощенными уравнениями», они имеют в виду?

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 [10] без указания конкретных страниц и одна ссылка на свои работы). При этом создается впечатление, что коллеги дискутируют с собственными фантазиями, комментируя и критикуя не то, что написано в статье [2] и заложено в методику, а то, чего там нет!

Вышеизложенное показывает, что в результате «аргументированной критики» авторы не опровергли ни одного положения методики НИИ ВОДГЕО: «Математическая модель процессов биологической очистки сточных вод обоснована анализом и использованием уравнений ферментативной кинетики трансформации загрязнений сточных вод и связывает между собой характеристики исходной и очищенной воды, концентрацию растворенного кислорода, концентрацию активного ила и его прирост [4; 8]. Модель позволяет рассчитывать сложные технологические схемы биологической очистки с учетом концентрации активного ила и растворенного кислорода. На базе модели разработаны основы проектирования и расчета сооружений биологической очистки городских и производственных сточных вод с использованием процессов нитри-денитрификации и биологической дефосфатации» [2; 9]. Общие рассуждения вокруг рассматриваемой методики никак нельзя признать хоть сколько-нибудь серьезным обоснованием выводов оппонентов.

5. О расчете прироста ила. На с. 35 (первая колонка) написано: «*Расчет прироста ила является важнейшим условием при применении подобных методов. В рассматриваемой УКМ (Методика ВОДГЕО) для расчета предлагается формула, аналогичная содержащейся в СНиП 2.04.03-85, в которой прирост определяется по сумме взвешенных веществ и БПК_{полн}, взятых с соответствующими коэффициентами. Причем определять коэффициенты рекомендуется экспериментально для данной сточной воды, либо аналогичных объектов. Однако, эта традиционная формула, хорошо известная специалистам для классической биологической очистки, к сожалению, недостаточна для современных процессов, так как не учитывает возраст ила*». Последняя фраза вызывает удивление. Ведь авторы сами пишут (с. 35, первая колонка): «*Система уравнений Лоуренса — Мак-Карти явилась исходной для разработки последующих моделей, где окисление конкретных субстратов определяется ферментативной кинетикой, а возраст ила и удержание соответствующих видов в биоценозе общим приростом ила*», а на с. 34 (вторая колонка, последний абзац): «... *возраст ила обратно пропорционален скорости роста...*». Здесь комментарии излишни! **Параметр не может не учитывать самого себя!** Каким же образом (с. 35, вторая колонка, первый абзац) коллеги рекомендуют использовать возраст ила при расчете его же прироста при том, что **возраст ила, как ими же сказано выше, является вторичным по отношению к приросту!**

Авторы настойчиво пытаются убедить «читателя, не погруженного в теорию процессов биологической очистки, но занимающегося проектированием...» в том, что «*На основе исследований ведущих специалистов (фамилии и ссылки на публикации отсутствуют) показано, что возраст ила определяет качество очищенной воды...*». Ввиду полного отсутствия каких-либо научно обоснованных аргументов в пользу такого, мягко говоря, сомнительного утверждения (кроме ссылки на безымянных «ведущих специалистов»), авторы пытаются заменить качество количеством (термин «возраст ила» в статье упоминается более 50 раз!). К сожалению, количество слов не компенсирует отсутствие аргументов!

6. Относительно утверждения о независимости остаточной концентрации вещества (в очищенной воде) от его исходной концентрации. На с. 34 (вторая колонка) коллеги пишут: «*Из уравнений Лоуренса — Мак-Карти следуют практически важные выводы: остаточная концентрация вещества не зависит от его исходной концентрации (пояснение — см. ниже)...*». При этом следует отметить, что коллеги делают выводы и ссылаются на статью Лоуренса и Мак-Карти ([14] по [1]), хотя с оригинальным текстом этого источника не знакомы, а цитируют его по некоему руководству ЕРА, качество и достоверность обзора в котором не известны. И далее, на с. 34 (вторая колонка) сказано: «*Поясним вывод о независимости остаточной концентрации вещества от его исходной концентрации. Уравнение Моно представляет собой взаимосвязь наблюдаемой скорости роста микроорганизмов и концентрации субстрата в реакторе, так как остальные его члены (μ_{max} и K_s) — константы. В рассматриваемом случае реактора-смесителя для очистки сточной воды мы имеем взаимосвязь между концентрацией в очищенной воде и скоростью роста микроорганизмов в реакторе. Если мы устанавливаем заданную скорость роста (левая часть уравнения — μ), то должны получить соответствующую концентрацию S . Поскольку возраст ила обратно пропорционален скорости роста $= \mu - K_d$, где K_d также константа (характеризует отмирание биомассы), то задав возраст ила θ , мы определим требуемую концентрацию субстрата в очищенной воде*».

Объяснение к этому тезису вызывает удивление. В любой серьезной книге или в учебнике можно прочитать, что модель Моно описывает «**зависимость** удельной скорости роста от концентрации субстрата», то есть концентрация субстрата является фактором, **обуславливающим само наличие явления роста** и, соответственно, причиной изменения удельной скорости роста.

Уважаемые коллеги лукавят, сначала называя «зависимость» «взаимосвязью», а затем подменяя причину и следствие: «Если мы **устанавливаем заданную скорость роста** (левая часть уравнения, μ), то **должны получить соответствующую концентрацию S** ». С позиций закона Моно и элементарной логики это **абсурд**. Установить (изменить) удельную скорость роста **просто так невозможно**. Физически изменить удельную скорость роста возможно только путем установления (изменения) концентрации субстрата, **но не наоборот!** Поэтому «*практически важные выводы*» коллег из уравнений Лоуренса – Мак-Карти, что «*остаточная концентрация вещества не зависит от его исходной концентрации*», не корректен ни по определению, ни по физическому смыслу, потому что исходная концентрация в основном определяет вместимость аэротенка, а остаточная концентрация является начальным условием при проектировании и **определяет скорость трансформации субстрата и роста биомассы**.

Именно поэтому **возраст ила не может быть фактором, «определяющим ход и показатели процесса»**, это величина производная («отражающая», а не «определяющая», сумму процессов, происходящих в аэротенке, включая рост, отмирание, вымывание и удаление отдельных видов микроорганизмов в активном иле, осуществляющих окисление или конверсию различных субстратов). Это всего лишь показатель, или критерий, который весьма приблизительно определяет диапазон параметров процесса, в котором возможна, например, нитрификация (его минимальное значение может варьироваться в весьма широких пределах в зависимости от состава сточных вод, кислородного режима, температуры и других параметров, поскольку кинетика роста разных видов микроорганизмов по-разному реагирует на изменение этих параметров). **Физически он ни на что не влияет и влиять не может (!)**, а лишь показывает сложившееся соотношение прироста и вымывания (удаления) биомассы из системы. Все это прекрасно видно из анализа формулы для расчета возраста ила.

Коллеги утверждают, что методика ATV-131 [3] основана на исследованиях «ведущих специалистов», **показавших, что возраст ила определяет качество очищенной воды вне зависимости от содержания загрязнений в поступающей сточной воде** (ссылка на такие работы и исследования отсутствует). В результате весь расчет сводится в основном к набору неких правил и коэффициентов, принимаемых или назначаемых проектировщиком исходя из его опыта и интуиции.

Методика ATV-131 применима только для расчета сооружений очистки хозяйственно-бытовых и близких к ним по составу стоков небольшой производительности со средним соотношением БПК₅/ХПК = 0,5. Во вводной части методики имеется дополнительное предупреждение о нежелательности увеличения содержания биорезистентного и инертного ХПК при сбросе промышленных и высококонцентрированных стоков. В основе методики лежит величина **необходимого** возраста ила, что соответствует принятой в Германии схеме совместного отведения городских и ливневых стоков. Методика имеет ряд существенных ограничений: при расчете принимается концентрация азота аммонийного в очищенной воде 1 мг/л (по российским нормам 0,39 мг/л); принимается, что диктующим процессом по времени обработки является нитрификация, а **кинетика окисления органики не учитывается вообще**. Для обеспечения нитрификации искусственно вводится ряд **коэффициентов запаса, в разы изменяющих конечный результат**. Методика не пригодна для расчета сооружений очистки сточных вод, отличных от бытовых, с примесью производственных стоков, характерных для Германии.

Принципиальная порочность попыток расчетов на основе возраста ила состоит в том, что для определения вместимости аэротенка (времени обработки) неминуем переход от скорости роста к скорости окисления. Это возможно только через экономический коэффициент (или коэффициент прироста), который не является величиной постоянной и меняется в разы в зависимости от степени конверсии субстрата (глубины очистки). Ни теоретически, ни практически оценить его реальные значения для активного ила не представляется возможным. Также невозможно непосредственно измерить в натуральных условиях скорость роста или активность конкретных видов микроорганизмов в активном иле, а параметры «чистой культуры» всегда будут существенно отличаться в составе сложного биоценоза активного ила. Отсюда и многочисленные коэффициенты запаса в методике ATV-131.

Сооружения биологической очистки (аэротенки) сегодня являются основными для очистки городских и производственных сточных вод. Этим методом очищается почти 100% сточных вод городов и поселений, а также производственные сточные воды большинства отраслей промышленности (химическая, нефтехимическая, нефтеперерабатывающая, коксохимическая, пищевая, текстильная, легкая, сельское хозяйство и др.). Каждый вид сточных вод уникален и тре-

бует индивидуального подхода к расчету сооружений биологической очистки.

В процессе подготовки СП 32.13330.2012 «СНиП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения», из-за отсутствия на тот момент формул и кинетических данных для расчета процессов нитрификации и денитрификации, метод расчета аэротенков был исключен вообще. В результате мы лишились арбитражного национального метода расчета очистных сооружений. Отказ от отечественных научных и технологических достижений, уникального опыта уже привел к неконтролируемой экспансии весьма сомнительных, не проверенных и зачастую просто не применимых в российских условиях методик, что может служить питательной средой для коррупции.

Методика НИИ ВОДГЕО, предназначенная для дополнения расчета СНиП 2.04.03.85 в части удаления биогенных элементов, является универсальной и обеспечивает расчет сооружений биологической очистки с удалением биогенных элементов **любых видов сточных вод, как городских и бытовых, так и производственных.**

Обширные исследования НИИ ВОДГЕО, проведенные на лабораторных и пилотных установках с десятками различных городских и производственных сточных вод, имеющих разный состав, а также обследование действующих сооружений с обработкой большого массива данных позволили подготовить полноценную методику расчета аэротенков с удалением биогенных элементов. Результаты длительных экспериментальных исследований процессов нитриденитрификации позволяют дополнить метод расчета, заложенный еще в СНиП 2.04.03-85, формулами и данными для расчета и оптимизации работы аэротенков с удалением соединений азота и фосфора. Разработанная программа позволяет на основе кинетических уравнений и уравнений материального баланса произвести технологический расчет всех стадий процесса, оптимизировать любую схему нитриденитрификации, рассчитать оптимальные параметры циркуляционных потоков, обеспечить высокую надежность работы сооружений и высокую степень биологической очистки сточных вод от органических загрязнений и соединений азота при соблюдении современных требований на сброс как в канализацию, так и в водоем. Эта методика испытана на большом числе объектов и используется НИИ ВОДГЕО при расчете и проектировании любых циркуляционных циклических схем удаления соединений азота и фосфора. Она применима при проектировании вновь строя-

щихся и реконструируемых систем наружной канализации постоянного назначения для населенных пунктов и объектов народного хозяйства.

Уважаемые коллеги провели большую работу по «аргументированной» критике методики расчета, разработанной специалистами НИИ ВОДГЕО, хотя им и не удалось доказать ни одного положения, порочащего методику. Тем не менее мы благодарны коллегам, поскольку их критика позволила нам еще раз внимательно рассмотреть собственные разработки и убедиться в их правильности и обоснованности.

К сожалению, в рассматриваемой статье [1] не содержится позитивных предложений, кроме продвижения сомнительной, неприемлемой для России зарубежной методики. В связи с этим вызывает недоумение, что уважаемые коллеги так сокрушаются о том, что методика, заложенная в СНиП, все еще широко используется проектировщиками, и **«срок действия ... (СНиП 2.04.03.85), к сожалению, недопустимо затянулся»** (с. 26, первая колонка, второй абзац). 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».

Считаем такой подход неправильным и необоснованным. Сегодня как никогда необходимо создание условий для повышения конкурентоспособности и снижения импортозависимости секторов российской промышленности, обеспеченных в том числе и переходом на принципы НДТ. Необходимо срочно восстанавливать компетенции российских специалистов, и сделать это можно только на основе возрождения отечественной прикладной науки, воссоздания научных школ, используя огромный научный и практический задел, созданный нашими предшественниками. Об этом давно уже говорим не только мы [11].

Вместо этого коллеги спешат списать в архив бесценный отечественный опыт и знания! **Не имея национальной расчетной базы технологий (в частности, НДТ), ни одну из них невозможно будет внедрить или проконтролировать, поскольку каждый вид сточных вод уникален и требует индивидуального подхода к расчету очистных сооружений биологической очистки. Именно эти задачи предназначена решать методика НИИ ВОДГЕО.**

Выводы

1. До сих пор метод расчета, заложенный в СНиП 2.04.03-85, является единственной возможностью для наших специалистов рассчитывать и контролировать сооружения биологической очистки городских и производственных сточных вод. Поэтому совершенствование и актуализация универсального, научно обоснованного и многократно проверенного на практике отечественного метода расчета сооружений биологической очистки городских и производственных сточных вод с удалением биогенных элементов является актуальной и неотложной задачей.

2. Анализ приведенных в статье [1] аргументов убедительно показал, что ни одного сколь-нибудь существенного факта, порочащего методику НИИ ВОДГЕО, в статье не приведено. А классификация «УКМ» и вывод, что «*Упрощенная кинетическая методика расчета азротенков с нитри-денитрификацией ... не учитывает множество принципиально важных факторов и не должна применяться*», являются необоснованными и надуманными.

3. Учитывая огромный объем городских и промышленных сточных вод в России и отсутствие в настоящее время отечественной нормативной документации по методам технологического расчета сооружений биологической очистки сточных вод, в том числе и с удалением биогенных элементов, внесение изменений в СП 32.13330.2012 «СНиП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения» (в части методики расчета азротенков с нитри-денитрификацией) позволит проводить проектирование, строительство и реконструкцию сооружений биологической очистки сточных вод любого состава на всей территории нашей страны.

4. Наличие надежного и проверенного национального метода расчета обеспечит контроль за необоснованным использованием неадекватных, непроверенных методов расчета, исключит неоправданное завышение стоимости строительства и реконструкции, бесконтрольное привлечение непроверенных зарубежных разработок в проекты, снизит уровень коррупции в этой

области, позволит грамотно реализовать внедрение разрабатываемых наилучших доступных технологий в отечественную практику.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
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. Standard ATV-DVWK-A 131E. Dimensions of Single-Stage Activated Sludge Plants, 2000.
4. Яковлев С. В., Скирдов И. В., Швецов В. Н., Бондарев А. А., Андрианов Ю. Н. Биологическая очистка производственных сточных вод: Процессы, аппараты и сооружения. – М.: Стройиздат, 1985. 208 с.
5. Морозова К. М., Степанов С. В., Степанов А. С., Соколова Т. В., Солкина О. С., Жукова М. А. Биологическая очистка сточных вод предприятий молочной промышленности в мембранном биореакторе (часть 2) // Водоснабжение и санитарная техника. 2017. № 2. С. 60–65.
6. Степанов С. В., Стрелков А. К., Швецов В. Н., Морозова К. М. Биологическая очистка сточных вод нефтеперерабатывающих заводов: Научное издание. – М.: Издательство АСВ, 2017. 202 с.
7. Баженов В. И., Эпов А. Н., Носкова И. А. Использование комплексов имитационного моделирования для технологий очистки сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. 2014. № 2. С. 62–71.
8. Морозова К. М. Принципы расчета систем биологической очистки сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. 2009. № 1. С. 26–31.
9. Швецов В. Н., Морозова К. М., Домнин К. В., Архипова Е. Е. Расчет сооружений биологической очистки сточных вод по схеме нитри-денитрификации // Водоснабжение и санитарная техника. 2012. № 7. С. 53–58.
10. Хенце М. Очистка сточных вод. Биологические и химические процессы. – М.: Мир, 2004. 471 с.
11. 8-я Научно-практическая конференция «Экологическая безопасность водопользования» // Водоснабжение и санитарная техника. 2017. № 9. С. 62–63.

On the criticism of the NII VODGEO method of designing biological wastewater treatment facilities with nutrients removal

V. N. SHVETSOV*

* Shvetsov Valerii Nikolaevich, Doctor of Engineering, Head of Competency Centre, «NII VODGEO» JSC
Build. 3, 9 B. Savvinskii Lane, 119435, Moscow, Russian Federation, tel.: +7 (499) 245-96-33, e-mail: post@vstmag.ru

The analysis of the critical notes published in the article by Ph. D. (Engineering) D. A. Danilovich and Engineer A. N. Epov «Comparative analysis of the methods of designing biological wastewater treatment facilities with nitrogen removal» in which the opponents make the following statements: the NII VODGEO method is «manual» and simplified, cannot be considered as mathematical model; the specific nitrification rate parameter cannot be used in calculations; the effect of temperature and other factors are not taken into account; «simplified» equations of enzyme kinetics cannot be used for nitrification-denitrification processes because of the inadmissible distortions under the impact of factors that these equations do not take into account; sludge age is determined by the effluent quality regardless of the pollutant concentration in the incoming wastewater; in sludge growth calculations sludge age shall be used; the residual concentration of a substance (in effluent) does not depend on its initial concentration; aeration tank calculations shall be based on sludge age is presented. Based on the detailed analysis of the comments and statements of the opponents their inconsistency and lack of proof is shown. It is proved that not a single substantial fact damaging the NII VODGEO method has been mentioned in the article, and the conclusions made by the authors are unfounded and unsubstantiated. The conclusion is made that the availability of a reliable and approved national calculation method will provide for restricting the unsubstantiated use of inadequate, untested calculation methods; eliminating unjustified construction and upgrade overpricing, uncontrolled engaging of untested foreign inventions in the projects; reducing the level of corruption in this field; implementing correctly the developed best available technologies in domestic practice. It is noted that up to now the calculation method included in SNiP 2.04.03-85 has been the only opportunity for the experts to design and control the facilities for municipal and industrial wastewater biological treatment. Consequently, improving and updating a universal, scientifically grounded and field-proven domestic method of designing the facilities for municipal and industrial wastewater biological treatment with regard to the nutrients removal has been a crucial and pending task. The attention is called to the need of urgent restoration of the expert competency, the revival of the Russian scholarly traditions on the basis of the immense scientific and practical capacity established by our predecessors.

Key words: wastewater, biological treatment, nutrients removal, nitrification, denitrification, sludge age, facilities design.

REFERENCES

1. Danilovich D. A., Epov A. N. [Comparative analysis of the methods of designing biological wastewater treatment facilities with nitrogen removal]. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie*, 2017, no. 4, pp. 28–40. (In Russian).
2. Shvetsov V. N., Morozova K. M. [Procedure of designing wastewater biological treatment facilities with nutrients removal]. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaia Tekhnika*, 2013, no. 11, pp. 42–47. (In Russian).
3. Standard ATV-DVWK-A 131E. Dimensions of Single-Stage Activated Sludge Plants, 2000.
4. Iakovlev S. V., Skirdov I. V., Shvetsov V. N., Bondarev A. A., Andrianov Iu. N. *Biologicheskaiia ochistka proizvodstvennykh stochnykh vod: Protssesy, apparaty i sooruzheniia* [Biological treatment of industrial wastewater: Processes, apparatus and facilities. Moscow, Stroizdat Publ., 1985, 208 p.].
5. Morozova K. M., Stepanov S. V., Stepanov A. S., Sokolova T. V., Solkina O. S., Zhukova M. A. [Biological treatment of dairy industry wastewater in a membrane bioreactor (part 2)]. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaia Tekhnika*, no. 2, pp. 60–65. (In Russian).
6. Stepanov S. V., Strelkov A. K., Shvetsov V. N., Morozova K. M. *Biologicheskaiia ochistka stochnykh vod neftepererabatyvaiushchikh zavodov: Nauchnoe izdanie* [Biological treatment of refinery wastewater: Scientific publication. Moscow, ASV Publ., 2017, 202 p.].
7. Bazhenov V. I., Epov A. N., Noskova I. A. [The use of simulation modeling packages for wastewater treatment technologies]. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaia Tekhnika*, 2014, no. 2, pp. 62–71. (In Russian).
8. Morozova K. M. [Principle of calculation of biological wastewater treatment systems]. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaia Tekhnika*, 2009, no. 1, pp. 26–31. (In Russian).
9. Shvetsov V. N., Morozova K. M., Domnin K. V., Arkhipova E. E. [Designing nitrification-denitrification retrofit at the biological treatment facilities]. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaia Tekhnika*, 2012, no. 7, pp. 53–58. (In Russian).
10. Henze M. *Ochistka stochnykh vod. Biologicheskii i khimicheskii protsessy* [Wastewater treatment. Biological and chemical processes. Moscow, Mir Publ., 2004, 471 p.].
11. [8th Scientific and Practical Conference «Environmental Safety of Water Use»]. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaia Tekhnika*, 2017, no. 9, pp. 62–63. (In Russian).