

DOI 10.35776/VST.2022.05.03
УДК 628.35



Сравнение результатов расчета аэротенков по методу Даниловича–Эпова и модели ASM2d (часть 1)

О. В. Харькина *

** Харькина Оксана Викторовна, кандидат технических наук, ведущий инженер-технолог, «СУЕЗ водные технологии и решения»; руководитель секции «Отведение и очистка сточных вод» Экспертно-технологического совета РАВВ, член рабочей группы по НДТ Минстроя РФ
123112, Россия, Москва, Пресненская наб., 10, бл. А, тел.: +7 (495) 937-28-80, e-mail: Oxana.Kharkina@suez.com*

Проведен анализ предложенной Д. А. Даниловичем и А. Н. Эповым методики расчета аэротенков, реализующих технологии удаления азота и фосфора. Дано сравнение результатов расчетов по данной методике и методике ASM2d. Показано, что, в отличие от методики ASM2d, которая относится к теоретическим моделям и описывает процессы биологической очистки сточных вод с помощью формул ферментативной кинетики, рассматриваемая методика представляет собой, по своей сути, эмпирический расчет, в котором заложены неизменяемые и в большинстве своем не имеющие физического смысла константы. Поскольку эмпирические модели связывают между собой параметры, полученные на основании экспериментальных данных конкретного объекта в строго ограниченных условиях, применять эти модели можно только в случае, когда все параметры другого объекта точно совпадают с данными объекта, на котором предлагаемая модель со-

ставлялась. Соответственно, применение любых эмпирических моделей, в том числе и рассматриваемой методики, на сооружениях, которые не являлись объектами для составления этих эмпирических моделей, ведет к риску получения некорректных результатов расчета. На основании выполненных расчетов показаны риски и ограничения использования метода, предложенного Даниловичем и Эповым, для расчета сооружений биологической очистки. В первой части статьи проведен расчетный анализ определения значений аэробного возраста активного ила, которые являются базовыми значениями для расчета объема аэробных зон аэротенков.

Ключевые слова: биологическая очистка, ASM2d, сточные воды, нитрификация, денитрификация, кинетические константы, активный ил, теоретические и эмпирические математические модели, сравнительный расчет сооружений биологической очистки.

WASTEWATER TREATMENT

Comparison of the results of calculating aeration tanks according to the method of Danilovich–Epov and ASM2d model (part 1)

O. V. Khar'kina *

** Khar'kina Oksana, Ph. D. (Engineering), Leading Process Engineer, SUEZ Water Technologies and Solutions, Head of the Section «Wastewater Disposal and Treatment» of the RAWW Expert and Technological Council, Member of the Working Group on BAT of the Ministry of Construction of the Russian Federation
Block A, 10 Prensenskaia Emb., Moscow, 123112, Russian Federation, tel.: +7 (495) 937-28-80, e-mail: Oxana.Kharkina@suez.com*

The analysis of the method proposed by D. A. Danilovich and A. N. Epov for calculating aeration tanks that implement nitrogen and phosphorus removal technologies is carried out. A comparison of the results of calculations by this method and ASM2d method is given. It is shown that, in contrast to the ASM2d method that refers to theoretical models and describes the processes of biological wastewater

treatment using the formulas of enzyme kinetics, the method under consideration is, in essence, an empirical calculation that contains constants that are invariable and, for the most part, not having the physical meaning. Since empirical models make a connection between the parameters obtained on the basis of the experimental data of a particular object under strictly limited conditions, these models can only be applied if all the parameters of another object exactly match the data of the object the proposed model was compiled for. Accordingly, using any empiric models, including the method under consideration, at the facilities that were not the objects for the compilation of these empiric models, leads to the risk of obtaining incorrect calculation results. Based on the performed calculations, the risks and constraints of using the method proposed by Danilovich and Epov for the calculation of biological treatment facilities are shown. In the first part of the paper, a design analysis was carried out to determine the values of the aerobic age of activated sludge that were the basic values for calculating the volume of aerobic zones of aeration tanks.

Key words: biological treatment, ASM2d, wastewater, nitrification, denitrification, kinetic constants, activated sludge, theoretical and empiric mathematical models, comparative calculation of the biological treatment facilities.

Задачей реконструкции или нового строительства канализационных очистных сооружений является стабильное обеспечение требуемого качества очищенной воды при оптимальных технических решениях и капитальных и эксплуатационных затратах. Таким образом, вкладываемые в реконструкцию или новое строительство очистных сооружений средства, в первую очередь, должны гарантированно обеспечить заданное в проекте качество очищенных вод во всем диапазоне входных параметров поступающих сточных вод, которые прописаны и закреплены ответственностью заказчика в Техническом задании (ТЗ). Диапазоны входных параметров поступающих на канализационные очистные сооружения сточных вод, прописанные в ТЗ в табличной форме, представляют собой ответственность заказчика. Обеспечение же того качества очищенной воды, которое также должно быть прописано в ТЗ заказчиком в виде таблицы, а не в виде ссылки на документы, это ответственность (в том числе и финансовая) проектной организации и/или реализатора проекта. Об ошибках при составлении ТЗ, которые допускает заказчик, и о том, как корректно его составлять, автор настоящей статьи подробно рассматривала в [1; 2].

В данной статье продолжаем разбирать методы и модели расчета сооружений биологической очистки, которые используются коллегами сегодня, и на основании проведенных расчетов показываем возможные причины недостижения требуемого качества очищенной воды при использовании, в частности, эмпирических моделей.

Отсутствие обязательной методики расчета канализационных очистных сооружений — абсолютно правильная позиция, так как ее наличие автоматически перекладывает ответственность за недостижение требуемого качества очищенной воды с проектировщика на разработчика методики (и на того, кто данную методику утвердил). Более того, если в ТЗ указано требование проводить расчеты по конкретной методике/модели или по конкретному программному

продукту (или его аналогу), то опять-таки в этом случае ответственность за недостижение требуемого качества очищенной воды несет не проектировщик/реализатор проекта, а заказчик. В СП 32.13330.2018 «Канализация. Наружные сети и сооружения» даны лишь общие положения и ограничения, которыми следует руководствоваться при проектировании. Это правильно и объяснимо с учетом финансовой ответственности проектной организации (реализатора проекта) перед заказчиком за обеспечение требуемого качества очищенной воды.

Поэтому выбор методики расчета — это ответственность исключительно проектной организации (технолога), который сам выбирает или разрабатывает метод/методику, подходы, которыми он руководствуется при разработке технологического решения и расчетах сооружений. Для того чтобы заказчик обезопасил себя от некорректных решений проектировщика/реализатора проекта, в контракте должно быть прописано гарантируемое проектной организацией/реализатором проекта качество очищенной воды, которое подтверждается эксплуатационным тестом, в ходе проведения которого проектная организация/реализатор проекта и показывает, что требуемое (или гарантируемое) качество очищенной воды достигается стабильно. Если же в ходе проведения эксплуатационного теста при входных показателях поступающих сточных вод, прописанных в контракте, требуемое (гарантируемое) качество очищенной воды не достигается, то должны вступать в силу финансовые отношения контракта между заказчиком и проектной организацией/реализатором проекта.

Следовательно, корректный метод расчета очистных сооружений, как и его правильное использование — это персональная ответственность конкретного технолога, который разрабатывает технологические проектные решения и проводит расчеты очистных сооружений. Технологом, проектирующим очистные сооружения, — это человек, имеющий профильное образование

и большой опыт проектирования и эксплуатации канализационных очистных сооружений. Но это уже тема другой статьи.

Данная статья является продолжением цикла статей автора, которые посвящены анализу методик расчета очистных сооружений, применяемых в РФ [3–5]. В настоящей статье приводится анализ метода расчета сооружений биологической очистки, предлагаемого Д. А. Даниловичем и А. Н. Эповым в [6] (далее – Методика), а также дано сравнение результатов расчета по Методике и по модели ASM2d.

Общепризнанным подходом оценки корректности различных моделей является сравнение полученных результатов расчетов с фактически данными реальных условий. Оценка корректности новых моделей или моделей, которые не прошли широкую апробацию в различных изменяющихся условиях на большом количестве объектов, проводится сравнением результатов расчета по данным моделям с результатами расчета по моделям, корректность которых не вызывает сомнения ввиду многочисленного подтверждения результатами работы сооружений, которые были рассчитаны по данным моделям.

Корректность модели ASM2d подтверждена результатами эксплуатации большого количества канализационных очистных сооружений в течение почти 20 лет. Результаты работы сооружений биологической очистки, как промышленных, так и городских сточных вод, рассчитанных с использованием ASM2d, приведены в том числе в [7–9].

Модель ASM2d – это матрица хорошо известных всем специалистам отрасли уравнений ферментативной кинетики, описывающих скорости биохимических процессов. ASM2d относится к классу теоретических моделей, так как описывает процессы биологической очистки исходя из природы и сущности самих процессов. Следует отметить, что еще более 50 лет назад в нашей стране расчет аэротенков, согласно СНиП II-32-74, основывался на формулах ферментативной кинетики биохимических процессов биологической очистки сточных вод. А в СНиП 2.04.03-85 «Канализация. Наружные сети и сооружения» дан уже детальный расчет аэротенков на аэробное окисление органических соединений с помощью уравнений ферментативной кинетики.

Математические модели аэротенков (биореакторов) с использованием уравнений ферментативной кинетики позволяют рассчитывать сооружения для различных типов сточных вод, конкретных условий реализации процессов и требований к качеству очищенной воды за счет

того, что сама формула не изменяется, а при расчете в эти формулы вводятся кинетические коэффициенты, которые соответствуют рассматриваемым сточным водам, требуемому качеству очищенной воды, реальным концентрациям растворенного кислорода и т. д. При этом у грамотного технолога не вызывает никаких проблем корректное определение всех параметров, которые закладываются в расчеты по этим моделям. В настоящее время эмпирический подход все более замещается научно обоснованным подходом, что в полной мере соответствует математическим моделям, описывающим процессы очистки сточных вод на базе уравнений ферментативной кинетики.

Личный профессиональный опыт автора данной статьи, описанный как в указанных выше работах [7–9], так и в других статьях, показывает неоспоримую необходимость использования для расчетов аэротенков (биореакторов) математических моделей, которые основываются на формулах ферментативной кинетики. Автором данной статьи разработана и применяется на многих объектах собственная динамическая модель OxiD [10–12] для расчета сооружений биологической очистки, в том числе с удалением азота и фосфора, в которой для описания биохимических процессов используются уравнения ферментативной кинетики. Эта модель была применена, в том числе, как для расчета технических решений реконструкции аэротенков Люберецких очистных сооружений (ЛОСст) в Москве под технологии биологического удаления азота и фосфора, так и для создания программного продукта технологического управления канализационных очистных сооружений. В настоящее время разрабатывается новая динамическая модель расчета и технологического управления канализационными очистными сооружениями OxiD-SM, где также используются формулы ферментативной кинетики.

Модель ВОДГЕО/СамГТУ (НИИ ВОДГЕО и Самарского государственного технического университета) [13] также представляет собой математическую модель, рассчитывающую сооружения биологической очистки сточных вод с помощью уравнений ферментативной кинетики. Проведенный сравнительный анализ результатов расчета аэротенков по моделям ASM2d и ВОДГЕО/СамГТУ показал высокую сходимость результатов [3].

Выбор автором статьи модели ASM2d в качестве контрольной для оценки других моделей и методов обусловлен тем, что ASM2d представляет собой математическую (теоретическую)

модель, которая описывает биохимические процессы очистки сточных вод формулами ферментативной кинетики и прошла многолетнюю апробацию на большом количестве канализационных очистных сооружений, в том числе с участием автора данной статьи.

Расчет аэротенков, представленный Д. А. Даниловичем и А. Н. Эповым, представляет, по своей сути, эмпирический расчет, в котором заложены неизменяемые и в большинстве своем не имеющие физического смысла константы. Даже формулы скоростей роста нитрифицирующих микроорганизмов, которые и представлены в Методике в виде формул ферментативной кинетики, правда, без множителя, учитывающего концентрацию растворенного кислорода, жестко привязаны к конкретным значениям кинетических констант, что делает и эту часть расчета эмпирической. Все остальные формулы расчета являются чисто эмпирическими зависимостями. Эмпирические модели, в отличие от рассмотренных выше математических моделей, представляют собой набор взаимосвязей, полученных путем наблюдения и эксперимента в конкретных условиях эксплуатации. Эмпирические модели по определению не описывают процессы очистки сточных вод ни с физической, ни с химической, ни с биологической позиций. Коэффициенты, которые закладывают в эмпирические зависимости, назначаются как величины постоянные. В этом и состоит риск применения эмпирических моделей вне объектов, на которых они были составлены. С учетом того, что на других сооружениях и даже на тех же самых сооружениях, но при других условиях, эмпирические зависимости, связывающие рассматриваемые параметры, будут другими, риск получения некорректных результатов расчетов весьма высок. Для других сооружений эмпирическую модель следует создавать заново, при этом изменятся не только значения коэффициентов, но и сама математическая зависимость будет другой. Для создания эмпирической зависимости для других рассматриваемых сооружений потребуются месяцы исследований. Следует отметить, что и методика ATV – «Standard ATV-DVWK-A 131E Dimension of Single-Stage Activated Sludge Plants 2000» также является эмпирической моделью, о чем автор подробно писала в [4].

Метод расчета аэротенков, предложенный Даниловичем и Эповым, основан на указанной выше методике ATV-DVWK-A 131E и предусматривает, что расчет объемов зон нитрификации-денитрификации базируется на следующем: «... поддержание минимально необходимого аэроб-

ного возраста ила, обеспечивающего сохранение в биомассе необходимой доли бактерий-нитрификаторов, соответствующей соотношению нагрузок по аммонийному азоту и БПК. С учетом присутствия в требованиях к качеству очистки как аммоний-иона, так и нитритов необходимо обеспечивать наличие достаточных концентраций обеих групп основных групп нитрификаторов».

То есть весь расчет объемов аэробной зоны аэротенков основан на значении минимального аэробного возраста активного ила и не учитывает расчет аэробных процессов окисления органических веществ, что влечет за собой риск занижения объемов аэробной зоны в случае, когда расчет через скорости аэробных процессов окисления органических соединений показывает больший объем аэробной зоны, чем ее расчет через значения аэробного возраста активного ила. Корректный же расчет объемов аэробных зон аэротенков должен обосновываться через расчетные значения: 1) аэробного возраста активного ила; 2) скорости процессов нитрификации; 3) скорости аэробного окисления органических соединений. Далее из указанных выше значений объемов выбирается максимальный.

Таким образом, подход к расчету значений объемов аэробных зон в рассматриваемой методике является неполным расчетом, что ведет к риску получения заниженных объемов аэробных зон.

Но даже и расчет объемов аэробных зон аэротенков через значения возраста активного ила в данной методике носит эмпирический характер. Рассмотрим подробнее предлагаемый расчет возраста активного ила. В рассматриваемой Методике записано: «Расчетные значения аэробного возраста являются функцией температуры в биореакторе, целевых концентраций аммонийного азота и азота нитритов, а также мощности ОС». Однако данное утверждение не является корректным.

Уравнение аэробного роста нитрифицирующих автотрофных микроорганизмов первой стадии процесса нитрификации μ_{A_1} , которое применяется в том числе и в модели ASM2d для расчета значения аэробного возраста активного ила, имеет вид:

$$\mu_{A_1} = \left[\frac{\mu_{\max A_1 (20^\circ\text{C})} \frac{S_{\text{NH}_4}}{S_{\text{NH}_4} + K_{S, \text{NH}_4, A}} \times \left(\frac{S_{\text{O}_2}}{S_{\text{O}_2} + K_{S, \text{O}_2, A_1}} - b_{A_1 (20^\circ\text{C})} \right)}{1} \right] e^{\lambda_1 (T-20)}, \quad (1)$$

где μ_{A_1} – текущая скорость роста нитрифицирующих микроорганизмов, участвующих в пер-

вой стадии процесса нитрификации, 1/сут; $\mu_{\max A_1(20^\circ\text{C})}$ – максимальная скорость роста нитрифицирующих микроорганизмов первой стадии процесса нитрификации при 20 °С, 1/сут; χ_1 – температурная константа для нитрифицирующих микроорганизмов первой стадии процесса нитрификации, 1/град; $K_{S, \text{NH}_4, A}$ – константа полунасыщения по аммонийному азоту, мгN–NH₄/л; S_{NH_4} – концентрация N–NH₄, которую необходимо обеспечить в очищенной воде, мг/л; K_{S, O_2, A_1} – константа полунасыщения по кислороду для нитрифицирующих микроорганизмов первой стадии процесса нитрификации, мг/л; S_{O_2} – концентрация растворенного кислорода в аэробной зоне, мг/л; $b_{A_1(20^\circ\text{C})}$ – константа распада нитрифицирующих микроорганизмов первой стадии процесса нитрификации при температуре 20 °С, 1/сут.

Для второй стадии процесса нитрификации аналогичное уравнение имеет вид:

$$\mu_{A_2} = \left[\begin{array}{l} \mu_{\max A_2(20^\circ\text{C})} \frac{S_{\text{NO}_2}}{S_{\text{NO}_2} + K_{S, \text{NO}_2, A}} \times \\ \times \frac{S_{\text{O}_2}}{S_{\text{O}_2} + K_{S, \text{O}_2, A_2}} - b_{A_2(20^\circ\text{C})} \end{array} \right] e^{\chi_2(T-20)}, \quad (2)$$

где μ_{A_2} , $\mu_{\max A_2(20^\circ\text{C})}$ – текущая и максимальная удельные скорости роста нитрифицирующих микроорганизмов, участвующих во второй стадии процесса нитрификации, 1/сут; χ_2 – температурная константа нитрифицирующих микроорганизмов второй стадии процесса нитрификации, 1/град; $K_{S, \text{NO}_2, A}$ – константа полунасыщения по азоту нитритов, мгN–NO₂/л; S_{NO_2} – концентрация N–NO₂, которую необходимо обеспечить в очищенной воде, мг/л; K_{S, O_2, A_2} – константа полунасыщения по кислороду для нитрифици-

рующих микроорганизмов второй стадии процесса нитрификации, мг/л; S_{O_2} – концентрация растворенного кислорода иловой смеси, мг/л; $b_{A_2(20^\circ\text{C})}$ – константа распада нитрифицирующих микроорганизмов второй стадии процесса нитрификации при температуре 20 °С, 1/сут.

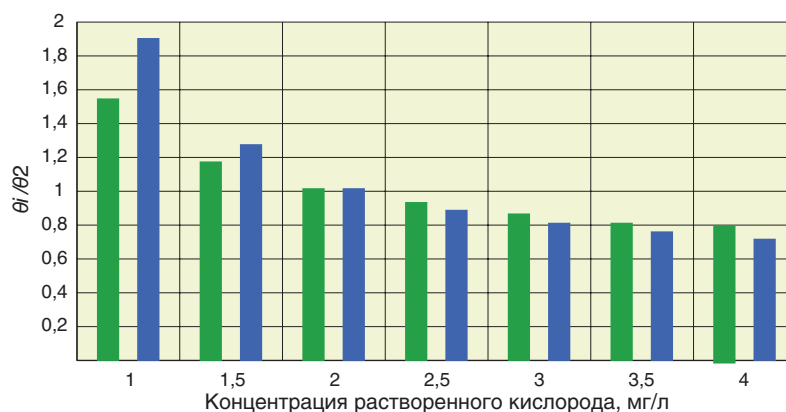
Так как значение аэробного возраста активного ила $\theta_{a, A}$, сут, определяется как величина, обратная расчетному значению скорости роста нитрифицирующих микроорганизмов под требуемое качество очищенной воды:

$$\theta_{a, A_1} = \frac{1}{\mu_{A_1}}; \quad (3)$$

$$\theta_{a, A_2} = \frac{1}{\mu_{A_2}}; \quad (4)$$

то очевидно, что значение возраста активного ила зависит не только, как принято в Методике Даниловича–Эпова, от температуры и целевой концентрации азота аммонийного и азота нитритов, но и от концентрации растворенного кислорода, что в рассматриваемой Методике не учитывается. Однако влияние концентрации растворенного кислорода на расчетное значение возраста активного ила является ключевым и существенным параметром, который категорически нельзя не учитывать.

На рисунке приведен результат расчета относительных значений аэробного возраста активного ила для температуры 18 °С (в качестве примера) при различных значениях концентрации растворенного кислорода (i , мгO₂/л), для достижения качества очищенной воды по аммонийному азоту 1 мг/л и азоту нитритов 0,1 мг/л (при значении констант полунасыщения по кислороду $K_{S, \text{O}_2, A_1} = 1$ мг/л и $K_{S, \text{O}_2, A_2} = 1,5$ мг/л).



Отношение значения аэробного возраста активного ила при концентрации растворенного кислорода (КРК) i мг/л к значению аэробного возраста активного ила при концентрации растворенного кислорода 2 мг/л для первой и второй стадий нитрификации

■ $\theta_{1,i}/\theta_{1,2}$; ■ $\theta_{2,i}/\theta_{2,2}$, где $\theta_{1,i}$ – аэробный возраст активного ила для первой стадии нитрификации при концентрации растворенного кислорода i мг/л (КРК = i мг/л); $\theta_{1,2}$ – то же, КРК = 2 мг/л; $\theta_{2,i}$ – аэробный возраст активного ила для второй стадии нитрификации (КРК = i мг/л); $\theta_{2,2}$ – то же, КРК = 2 мг/л

На рисунке представлены отношения расчетных значений аэробного возраста активного ила при концентрациях растворенного кислорода i мг/л ($\theta_{a,A_{1,i}}$ и $\theta_{a,A_{2,i}}$) к расчетным значениям аэробного возраста активного ила при концентрациях растворенного кислорода 2 мг/л ($\theta_{a,A_{1,2}}$ и $\theta_{a,A_{2,2}}$) при прочих данных, указанных выше. Анализируя данные, видно, что снижение концентрации растворенного кислорода с 2 до 1,5 мг/л требует для обеспечения концентрации аммонийного азота 1 мг/л увеличения значения аэробного возраста ила и, соответственно, объема аэробной зоны аэротенка на 15%, а для достижения требований по азоту нитритов 0,1 мг/л снижение концентрации растворенного кислорода с 2 до 1,5 мг/л требует увеличения значения аэробного возраста активного ила (и, соответственно, объема аэробной зоны аэротенка) на 25%. С другой стороны, увеличение концентрации растворенного кислорода с 2 до 3 мг/л для рассматриваемого расчетного примера позволяет снизить значения аэробного возраста активного ила (и, соответственно, объема аэробных зон) на 15 и 21% для достижения концентрации аммонийного азота 1 и 0,1 мг/л азота нитритов соответственно. Данный расчет наглядно показывает категорическую необходимость учитывать концентрацию растворенного кислорода при расчете значений аэробного возраста активного ила.

В рассматриваемой Методике концентрация растворенного кислорода не учитывается, что требует дополнения данного метода учетом влияния концентрации растворенного кислорода на расчет значений аэробного возраста активного ила.

Следует отметить, что по своей структуре и подходам предлагаемая Методика является классической эмпирической моделью, основанной на упомянутой выше немецкой методике ATV – «Standard ATV-DVWK-A 131E Dimension of Single-Stage Activated Sludge Plants 2000», в которой заложены эмпирические константы, таблицы, зависимости. С учетом того, что эмпирические модели разрабатываются на основании экспериментальных данных конкретного объекта, для других объектов они могут только «рекомендовать» те или иные зависимости, коэффициенты, графики и таблицы с большим количеством условий и оговорок. Поэтому звучит достаточно странно то, что в предлагаемом эмпирическом методе расчета выкладки даются в формате утверждений, таких как: «следует определять», «следует принимать» и т. д.

Выше было показано, насколько значимо для расчетов аэротенков значение концентрации

растворенного кислорода, а его отсутствие в Методике, предлагаемой Даниловичем и Эповым, представляет большой риск получения недостоверных результатов расчетов. Более того, авторы метода отмечают, что «*Расчетное (проектируемое) значение аэробного возраста ила t_{ia} определяется как:*

$$t_{ia} = t_{iamin} K_{SF},$$

где t_{iamin} – минимальное теоретическое значение аэробного возраста ила, обеспечивающее поддержание процесса нитрификации с заданным значением концентрации азота; K_{SF} – коэффициент надежности, учитывающий фактор неравномерности поступления загрязнений и других возможных воздействий, таких как изменение температуры, pH, токсичности и других отклонений от расчетных условий. Значение K_{SF} рекомендуется принимать по таблице 5.4 в зависимости от масштаба ОС (с учетом того, что чем крупнее ОС, тем меньше вероятность и выраженность описанных воздействий), а также наличия или отсутствия усреднения сточных вод».

Рассмотрим детально предлагаемый авторами подход к определению расчетного значения аэробного возраста ила.

Минимальные теоретические значения аэробного возраста ила t_{iamin} , обеспечивающие поддержание процессов нитрификации с заданным значением концентрации азота, в рассматриваемой Методике предлагается принимать как величины постоянные для конкретных температур. То есть приведены таблицы (таблица 5.5 «минимальное значение аэробного возраста ила для окисления аммонийного азота» и таблица 5.6 «минимальное значение аэробного возраста ила для окисления азота нитритов» Методики), где именно в табличной форме даны зависимости значений t_{iamin} от температуры. Это эмпирический подход в чистом виде. Более того, авторы даже не рекомендуют, а утверждают необходимость принимать именно такие значения: «*Значение минимального возраста ила t_{iamin} следует принимать с учетом расчетных концентраций по аммонийному азоту, так и по азоту нитритов. С этой целью следует определить по таблицам 5.5 и 5.6 два значения возраста ила – $t_{iaminN-NH_4}$ и $t_{iaminN-NO_2}$, соответствующие расчетной температуре и требуемым значениям концентраций, и принять максимальное из них*». Почему следует принимать именно эти значения; для каких сточных вод (даже городские сточные воды отличаются характеристиками в очень широком диапазоне) и при каких условиях были определены именно эти значения; где результаты экспериментов, ко-

торые позволили определить именно эти значения; и, как было сказано выше, при каких реальных данных (в том числе и при каком значении концентрации растворенного кислорода) получены эти эмпирические зависимости; каковы риски и ограничения (в цифрах) использования этого эмпирического подхода? Все это остается за описанием данной Методики и не позволяет ее применять без существенных опасений получения недостоверных результатов.

Справедливости ради следует отметить, что авторы в Приложении Б дают формулу, результаты расчетов по которой и приведены в таблицах 5.5 и 5.6. Но как раз эти формулы и подтверждают риски применения данной методики для получения корректного результата, изложенные выше.

Итак, в Приложении Б для определения минимальных возрастов активного ила даются формулы ферментативной кинетики, которые, однако, как раз и подтверждают как указанные выше ограничения (не учтены концентрации растворенного кислорода), так и эмпиричность самой модели (все коэффициенты даны как константы, то есть кинетические характеристики процессов нитрификации, определенные авторами для каких-то определенных сточных вод и определенных условий, предлагается использовать для других сточных вод и других условий, что и приводит к высокому риску получения недостоверных результатов). В Приложении Б даются следующие зависимости определения значений минимального возраста активного ила.

Для процесса окисления аммонийного азота значение минимального аэробного возраста активного ила $t_{ia\min\text{NH}_4}$ определяется через скорость роста μ_1 :

$$t_{ia\min 1} = \frac{1}{\mu_1},$$

что соответствует общему подходу – см. уравнение (3).

Далее приведены используемые формулы определения скорости роста нитрифицирующих микроорганизмов первой стадии μ_1 при заданной температуре:

$$\mu_1 = \mu_1(T) \frac{S_1}{S_1 + K_{S1}} - b_1(T),$$

где $\mu_1(T)$ – «максимальные значения скорости роста при заданной температуре»; S_1 – «расчетные концентрации ... аммонийного азота в очищенной воде, мг/дм³»; « K_{S1} – коэффициент полунасыщения»; $b_1(T)$ – скорость отмирания биомассы при заданной температуре».

Значение $\mu_1(T)$ в рассматриваемой методике предлагается определять как:

$$\mu_1(T) = \mu_{\max 1} \alpha^{T_{ww} \dim^{-15}},$$

где $\mu_{\max 1}$ – «значение максимальной скорости роста биомассы при 15 °С (здесь и далее значения см. в табл. Б1)»; α – «коэффициент»; « T – температура».

«Скорость отмирания биомассы» описана следующим уравнением:

$$b_1(T) = b_{151} c^{T_{ww} \dim^{-15}},$$

где, как указано в Методике «... b_{151} – скорость отмирания биомассы данной группы нитрификаторов при 15 °С; c – коэффициенты».

Аналогичные уравнения даны и для определения скорости роста микроорганизмов второй стадии.

Анализ подхода авторов к определению ими минимальных значений аэробного возраста активного ила показывает, что действительно расчет производится по формулам ферментативной кинетики. Однако, как видно по самим формулам, авторы учитывают только конечное требуемое значение концентраций очищенной воды и температуру. А это как раз и есть подтверждение того, что они не учитывают даже концентрацию растворенного кислорода, не говоря уже о других параметрах (таких как щелочность, аммонификация, потребление азота на прирост биомассы и другие). Более того, за описанием определения значений аэробного возраста ила, пусть по усеченным, но все-таки формулам ферментативной кинетики, очевидна сама эмпирика данной Методики, так как все коэффициенты, заложенные в рассмотренные уравнения, даны как величины постоянные. Именно эти коэффициенты, которые специфичны для каждого типа сточных вод и условий реализации биохимических процессов очистки, отличаются друг от друга в разы. Именно учет этого обстоятельства в теоретических моделях позволяет получать корректные результаты расчетов для любых проектируемых очистных сооружений. А что же мы видим в рассматриваемой Методике? Какие значения коэффициентов предлагают брать авторы? В книге [6] написано следующее: «Коэффициенты кинетических уравнений (Б-2) – (Б-6) принимаются по табл. Б1 и Б2». То есть авторы, мало того, что не учитывают в расчетах даже концентрацию растворенного кислорода, так еще и принимают значения коэффициентов как константы.

Рассмотрим подробно, что авторы предлагают читателю в **таблицах Б1 и Б2** (данные табли-

Таблица Б1

Значения кинетических коэффициентов для расчета возраста ила для 1-й и 2-й ступеней нитрификации при концентрации аммонийного азота не менее 1 мг/дм³

Коэффициент	Ступени нитрификации	
	1-я (окисление аммония до нитрита): символы с индексом 1	2-я (окисление нитрита до нитрата): символы с индексом 2
a, c^*	1,103*	—
f, d^*	—	0,059*
μ_{\max}	0,5	0,7
b_{15}	0,1	0,05
K_s	0,55	0,25

* В принципе значения данных коэффициентов могут являться разными, но в большинстве работ они приняты одинаковыми. Данный подход применен в настоящем расчете. Для таблицы Б2 — аналогично

Таблица Б2

Значения кинетических коэффициентов для расчета возраста ила для 1-й и 2-й ступеней нитрификации при концентрации аммонийного азота в очищенной воде 0,4 мг/дм³

Коэффициент	Ступени нитрификации	
	1-я (окисление аммония до нитрита): символы с индексом 1	2-я (окисление нитрита до нитрата): символы с индексом 2
a, c^*	1,103	—
f, d^*	—	0,059
μ_{\max}	0,35	0,5
b_{15}	0,05	0,05
K_s	0,3	0,1

Для дальнейших расчетов как $t_{ia, \min}$ далее принимается максимальная из двух полученных величин $t_{ia, \min 1}$ и $t_{ia, \min 2}$.

Уравнения приложения Б могут быть применены при расчетной концентрации азота нитритов не ниже 0,05 мг/дм³.

цы из рассматриваемой Методики приводятся в этой статье без изменений).

Как видно из приведенных выше таблиц, значения коэффициентов даны постоянными. Более того, авторы не поясняют, как требования к качеству очищенной воды по аммонийному азоту влияют на кинетические характеристики микроорганизмов, которые реализуют вторую стадию процесса нитрификации и отвечают за качество очищенной воды по нитритам. Это другие микроорганизмы, они не участвуют в первой стадии процесса нитрификации (окисление аммония), поэтому такая привязка констант процесса окисления нитритов к качеству очищенной воды по аммонийному азоту выходит за границы признанных и используемых математических моделей, и также представляет эмпири-

ческий подход, обуславливающий высокий риск неполучения заданного качества очищенной воды за пределами условий, при которых авторы Методики строили свою эмпирическую модель.

Корректное же определение данных коэффициентов для рассматриваемых сточных вод и под конкретные условия и есть основной вопрос получения адекватных результатов. Значения данных коэффициентов даже для городских сточных вод отличаются в разы, что дает разницу объемов аэробных зон аэротенков на десятки процентов. Для грамотного технолога определение корректных значений данных коэффициентов для проектируемых сооружений не представляет труда.

В табл. 1 приведены данные авторов, которые определяли значения кинетических констант первой стадии процессов нитрификации, при этом в данной таблице представлена лишь малая доля массива значений коэффициентов, которые были получены специалистами.

Как видно из табл. 1, даже для городских сточных вод, и только рассматривая данные небольшого количества авторов, можно увидеть, что значения коэффициентов, закладываемых в формулы ферментативной кинетики нитрифицирующих микроорганизмов, могут отличаться для различных городских сточных вод в несколько раз, что приводит к соответствующей разнице в скоростях процессов и, соответственно, в расчетных объемах сооружений на десятки процентов.

Поэтому и возникает вопрос — почему, из каких источников или по каким проведенным исследованиям авторы Методики приняли значения указанных коэффициентов постоянными?

Рассмотрим результаты расчетов минимальных значений аэробного возраста активного ила, выполненных по предлагаемой Методике с принятыми значениями коэффициентов, и пусть даже по той усеченной формуле, которая дана в Методике (то есть без влияния концентрации растворенного кислорода) и со значениями кинетических констант из диапазонов значений табл. 1. Расчет выполняем на температуру 18 °С и качество очищенной воды по азоту аммонийно-

Таблица 1

Константа	Henze M., etc. [14; 15]	Marais GvR., Ekama G. A. [16]	Gujer W. [17]	Сточные воды г. Москвы [8; 18]
$\mu_{\max A}, 1/\text{сут}$	0,34–0,65	0,33–0,65	0,8–1	0,45–0,52
$K_{S, \text{NH}_4\text{-A}}, \text{мг/л}$	0,6–3,6	1	0,6	1,1
$K_{S, \text{O}_2}, \text{мг/л}$	0,5–2	—	—	1,1–1,9
$b_A, 1/\text{сут}$	0,05–0,15	0,04	0	0,11

му 1 мг/л и азоту нитритов 0,1 мг/л. Тогда значение минимального аэробного возраста активного ила $t_{i\text{aminNH}_4}$, составит:

$$\begin{aligned}\mu_1 &= \mu_1(T) \frac{S_1}{S_1 + K_{S1}} - b_1(T) = \\ &= \mu_{\text{max}1} \alpha^{T_{\text{wwdim}} - 15} \frac{S_1}{S_1 + K_{S1}} - b_{151} c^{T_{\text{wwdim}} - 15}; \\ \mu_1 &= 0,5 \cdot 1,103^{18-15} \frac{1}{1 + 0,55} - 0,1 \cdot 1,103^{18-15} = 0,298 \text{ сут}^{-1}.\end{aligned}$$

И далее:

$$t_{i\text{amin}1} = \frac{1}{\mu_1} = 3,36 \text{ сут.}$$

Таким образом, расчет минимального аэробного возраста активного ила $t_{i\text{aminNH}_4}$ для температуры 18 °С и концентрации аммонийного азота в очищенной воде 1 мг/л, выполненный по рассматриваемому методу, дает значение $t_{i\text{aminNH}_4} = 3,36$ сут. Однако в таблице 5.5 данной Методики это значение составляет 3,5 сут, так как авторы говорят о том, что «Принятие аэробного возраста менее 3,5 суток (без учета K_{SF}) не рекомендуется». Почему и на каком основании «не рекомендуется», авторы не уточняют. Это опять эмпирический подход в чистом виде. Однако идем в расчетах по данному методу дальше.

Полученное минимальное значение аэробного возраста активного ила $t_{i\text{aminNH}_4}$ еще не является в Методике расчетным (проектным) значением. Авторы пишут: «Расчетное (проектируемое) значение аэробного возраста ила t_{ia} определяется как:

$$t_{ia} = t_{i\text{amin}} K_{SF},$$

где $t_{i\text{amin}}$ – минимальное теоретическое значение аэробного возраста ила, обеспечивающее поддержание процесса нитрификации с заданным значением концентрации азота; K_{SF} – коэффициент надежности, учитывающий фактор неравномерности поступления загрязнений и других возможных воздействий, таких как изменение температуры, рН, токсичности и других отклонений от расчетных условий».

Значения коэффициентов надежности (запаса) K_{SF} в данном методе расчета назначаются авторами опять как постоянные величины в зависимости от нагрузки по БПК₅ и от наличия или отсутствия системы автоматического регулирования кислородного режима. Возникает вопрос, как единственный коэффициент, пусть даже интегральный, может учитывать и специфику сточных вод, включая конкретные значения рН, щелочности, наличие/отсутствие тех или иных ингибирующих биохимические процессы веществ,

и кислородный режим (конкретно – концентрацию растворенного кислорода)? Очевидный ответ, что не может. Более того, присвоение коэффициентам запаса конкретных значений опять говорит об ограниченности и субъективности данной Методики, и с учетом обозначенных вопросов возникает большой риск применения такого подхода к расчетам. Получается, что даже при концентрации растворенного кислорода 0 мг/л коэффициент K_{SF} позволит нивелировать данную ситуацию и все равно получить нитрификацию. Данный подход, по мнению автора настоящей статьи, является ошибочным.

Тем не менее продолжим расчет. Итак, Методика предлагает назначать коэффициент надежности (запаса) по таблице 5.4 в зависимости от расчетной нагрузки по БПК₅ и наличия/отсутствия системы автоматического поддержания концентрации растворенного кислорода. То, что авторы Методики приняли зависимость коэффициента надежности от нагрузки по БПК₅, да еще и с фиксированными значениями коэффициентов, которые вызывают сомнения в отражении реальной картины, еще раз подчеркивает, что рассматриваемая модель основана на эмпирических наблюдениях, а не на математически описываемых теоретических взаимосвязях моделируемой системы. А зависимость K_{SF} вообще порождает очень простой вопрос: как наличие/отсутствие системы автоматического регулирования может влиять на значение данного коэффициента? Мы видим, что в Методике наличие системы автоматического поддержания концентрации растворенного кислорода дает снижение значения данного коэффициента.

Рассмотрим два случая: первый – наличие системы автоматического поддержания концентрации растворенного кислорода, при котором уставка будет выставлена даже на 2 мг/л; и второй случай – отсутствие системы автоматического поддержания концентрации растворенного кислорода, однако концентрация растворенного кислорода даже в моменты максимальных нагрузок будет составлять 2,5–3 мг/л. Очевидно, что во втором случае скорости процессов будут выше, как уже было показано в данной статье, значит, значение коэффициента надежности, даже при подходе авторов к расчету, будет меньше при отсутствии системы автоматического регулирования, что противоречит принятому утверждению рассматриваемой Методики. Тем не менее возвращаемся к расчету по анализируемой Методике.

Принимаем поправку авторов Методики, что при минимальном аэробном возрасте активного

Таблица 2

Кинетический параметр	Значение кинетического параметра	Расчетное значение аэробного возраста ила	Коэффициент запаса	Проектное значение аэробного возраста ила
$\mu_{\max A_1}$, 1/сут	0,34/0,8/0,57	6,5/7,3/6,5	1	6,5/7,3/6,5
$K_{S, NH_4, A}$, мг/л	0,3/0,7/0,5			
K_{S, O_2, A_1} , мг/л	0,5/2,0/1,25		1,15	7,5/8,4/7,5
b_{A_1} , 1/сут	0,03/0,06/0,045			
χ_1 , 1/град	0,08/0,12/0,1			

ила $t_{i\min NH_4}$ менее 3,5 сут следует принимать в расчетах $t_{i\min NH_4} = 3,5$ сут. Как показано выше, для температуры 18 °С и концентрации аммонийного азота 1 мг/л Методика по формуле Приложения Б дает значение 3,36 сут. С учетом того, что данное значение 3,36 сут менее 3,5 сут, принимаем $t_{i\min NH_4} = 3,5$ сут.

Далее, согласно таблице 5.4 Методики, принимаем коэффициенты надежности. Возьмем крайние значения заложенных в Методике коэффициентов: 1,6 (для расчетной входной нагрузки по БПК₅ менее 1000 кг/сут и без системы автоматического поддержания концентрации растворенного кислорода) и 1,2 (для расчетной входной нагрузки по БПК₅ более 6000 кг/сут и с системой автоматического поддержания концентрации растворенного кислорода).

Тогда расчетные значения аэробного возраста ила t_{ia} составят для температуры 18 °С и концентрации аммонийного азота в очищенной воде 1 мг/л: 5,6 сут (для расчетной входной нагрузки по БПК₅ менее 1000 кг/сут и без системы автоматического поддержания концентрации растворенного кислорода) и 4,2 сут (для расчетной входной нагрузки по БПК₅ более 6000 кг/сут и с системой автоматического поддержания концентрации растворенного кислорода).

Теперь сравним эти данные с результатами, которые получаются по модели ASM2d для концентрации растворенного кислорода 2 мг/л и с кинетическими параметрами, приведенными выше. Для расчета принимаем значения из табл. 1 и 2 данной статьи как минимальные/максимальные/средние. Данные значения для конкретных сточных вод могут быть и другими, но здесь мы приняли крайние и средние значения как из проанализированных нами источников, так и реального опыта автора статьи, чтобы в цифрах показать риск использования эмпирических моделей. Концентрацию растворенного кислорода приняли 2 мг/л, температуру 18 °С, концентрацию аммонийного азота в очищенной воде 1 мг/л, чтобы полу-

чить корректные результаты сравнения данных (табл. 2).

Таким образом, мы получили, что значение аэробного возраста активного ила для обеспечения концентрации азота аммонийного в очищенной воде 1 мг/л при температуре 18 °С, при КРК = 2 мг/л, при расчетных коэффициентах, принятых в табл. 2, составляет 6,5–7,3 сут при значении коэффициента надежности 1 и 7,5–8,4 сут при коэффициенте надежности 1,15. При этом значение (проектное) аэробного возраста активного ила по Методике Даниловича–Эпова с учетом заложенных в нее коэффициентов надежности составляет 4,2–5,6 сут. То есть Методика Даниловича–Эпова дает меньшие проектные значения аэробного возраста активного ила при заложенных константах, чем результаты, полученные на данных абсолютного большинства других авторов. Это говорит о том, что те сточные воды, результаты исследований на которых использованы авторами в их Методике, обладают более высокими скоростями процессов, чем абсолютное большинство других сточных вод. Разница в значениях аэробного возраста активного ила соответствует разнице в объемах аэробных зон аэротенков при их расчете через значения аэробного возраста активного ила. То есть в данном случае расчетные необходимые объемы аэробных зон, полученные по данным специалистов для абсолютного большинства сточных вод при обеспечении концентрации аммонийного азота 1 мг/л, в 1,3–1,5 раз больше, чем результаты, которые дает рассматриваемая Методика по принятым эмпирическим подходам.

Аналогичное расхождение получается и при расчете аэробного возраста активного ила на азот нитритов. Более того, необходимо отметить, что Методика Даниловича–Эпова не рассчитывает аэротенки на концентрации нитритов менее 0,05 мг/л по азоту нитритов.

Таким образом, полученные результаты подтверждают ограниченность рассматриваемой модели и риск ее использования на других сточ-

ных водах и при условиях, отличных от заложенных авторами при составлении Методики, которая основывается также на эмпирической модели ATV.

Выводы

1. Методика расчета аэротенков, предложенная Д. А. Даниловичем и А. Н. Эповым, представляет собой эмпирическую модель. В Методике использованы подходы и ряд формул немецкого стандарта ATV-DVWK-A 131E «Расчет сооружений одноступенчатой биологической очистки с активным илом», который также представляет собой классическую эмпирическую модель с присущими ей ограничениями и субъективностью.
2. Советская и российская школа специалистов отрасли рассчитывает сооружения биологической очистки по теоретическим моделям более 50 лет, начиная со СНиП II-32-74 «Канализация. Наружные сети и сооружения». Это дает право утверждать о необходимости использования для расчета аэротенков математических моделей, основанных на уравнениях ферментативной кинетики с коэффициентами, характерными для конкретных сточных вод.
3. Методика расчета аэротенков Даниловича—Эпова рассчитывает аэротенки только через возраст активного ила и не учитывает скорости процессов окисления органических веществ в аэробных условиях и скорости нитрификации, что ведет к риску существенного занижения объемов сооружений в случаях, когда расчетные объемы, полученные через скорости аэробного окисления органических веществ, больше, чем расчетные объемы, полученные через значения возраста активного ила.
4. Методика расчета аэротенков Даниловича—Эпова не учитывает значения концентрации растворенного кислорода, что ведет к риску получения некорректных результатов расчетов объемов сооружений.
5. Методика дает объемы аэробных зон аэротенков на десятки процентов ниже, чем объемы, рассчитанные по формулам ферментативной кинетики с реальными значениями параметров биохимических процессов, что подтверждает высокий риск недостижения заданного качества очищенных вод при условиях, отличных от заложенных авторами при составлении Методики.
6. Методика расчета аэротенков Даниловича—Эпова не рассчитывает аэротенки на концентрации азота нитритов менее 0,05 мг/л, что еще сужает возможности ее применения.
7. Эмпирические модели расчетов любых объектов, включая и канализационные очистные

сооружения, в настоящее время все более замещаются научно и практически обоснованным подходом, что в полной мере соответствует математическим моделям, описывающим (при рассмотрении аэротенков) процессы очистки сточных вод на базе уравнений ферментативной кинетики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харькина О. В. Техническое задание на реконструкцию очистных сооружений: как избежать ошибок (часть 1) // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. 2021. № 2. С. 48–53.
2. Харькина О. В. Техническое задание на реконструкцию очистных сооружений: как избежать ошибок (часть 2) // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. 2021. № 3. С. 53–59.
3. Швецов В. Н., Харькина О. В., Степанов С. В. Сравнение результатов расчета аэротенков по моделям НИИ ВОДГЕО/СамГТУ и ASM2d // Водоснабжение и санитарная техника. 2021. № 5. С. 18–29.
4. Харькина О. В., Искалиева К. Р., Малич Е. В. Сравнение расчета аэротенков по моделям ASM2d и ATV // Водоснабжение и санитарная техника. 2021. № 7. С. 13–22.
5. Харькина О. В. Методы расчета сооружений биологической очистки: сравнительный анализ // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. 2021. № 6. С. 50–62.
6. Данилович Д. А., Эпов А. Н. Расчет и технологическое проектирование процессов и сооружений удаления азота и фосфора из городских сточных вод. — М., 2020. 225 с.
7. Мойжес О. В. Применение динамической модели «OxiD» для реконструкции аэротенков ЛСА по технологии биологического удаления азота и фосфора: Материалы Международного конгресса «Вэйст-ТЭК–2005». — М., 2005. С. 112–116.
8. Мойжес О. В. Динамическая модель OxiD сооружений биологической очистки сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. 2008. № 10. С. 52–57.
9. Харькина О. В., Закиев Р. Р. Достижение стабильного качества очищенной воды на уровне ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения: Сборник статей Международной научно-практической конференции «Яковлевские чтения». — М., 2020. С. 198–201.
10. Мойжес О. В. Математическая модель процессов очистки сточных вод «OxiD»: Материалы Международного конгресса «ЭКВАТЭК–2004». — М., 2004. С. 44–47.
11. Мойжес О. В. Динамическое моделирование аэротенков по результатам их трассирования: Материалы Международного конгресса «ЭКВАТЭК–2004». — М., 2006. С. 48–52.
12. Мойжес О. В., Шотина К. В. Динамическое моделирование — перспективный подход к проектированию со-

- ружений биологической очистки сточных вод // Экология и промышленность России. 2009. № 2. С. 10–11.
13. Швецов В. Н., Морозова К. М., Степанов С. В. Расчет сооружений биологической очистки городских и производственных сточных вод в аэротенках с удалением биогенных элементов // Водоснабжение и санитарная техника. 2018. № 9. С. 26–39.
 14. Henze M., Gujer W., Mino T., van Loosdrecht V. Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. – London: IWA Publishing, 2000. 130 p.
 15. Henze M., Laslie Grady Jr. C. P., Gujer W., Marais GvR., Matsuo T. A general model for single-sludge wastewater treatment system // Water Research. 1987. No. 21 (5) P. 505–515.
 16. Marais GvR., Ekama G. A. The activated sludge processes. Part 1. Steady state behavior // Water SA. 1976. No. 2 (4). P. 163–200.
 17. Gujer W. Design of a nitrifying activated sludge process with the aid of dynamic simulation // Water Technology. 1977. No. 9 (2). P. 323–336.
 18. Мойжес С. И. Разработка технологии удаления биогенных элементов из городских сточных вод с дефосфотацией в аноксидных условиях: Дисс. ... кандидата технических наук. – Волгоград, 2013. 136 с.

REFERENCES

1. Khar'kina O. V. [Terms of reference for the reconstruction of treatment facilities: how to avoid mistakes (part 1)]. *Nailuchshchie Dostupnye Tekhnologii Vodosnabzheniia i Vodootvedeniia*, 2021, no. 2, pp. 48–53. (In Russian).
2. Khar'kina O. V. [Terms of reference for the reconstruction of treatment facilities: how to avoid mistakes (part 2)]. *Nailuchshchie Dostupnye Tekhnologii Vodosnabzheniia i Vodootvedeniia*, 2021, no. 3, pp. 53–59. (In Russian).
3. Shvetsov V. N., Khar'kina O. V., Stepanov S. V. [Comparison of the calculation results for aeration tanks using the NII VODGEO/SAMGTU and ASM2d models]. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaia Tekhnika*, 2021, no. 5, pp. 18–29. (In Russian).
4. Khar'kina O. V., Iskalieva K. R., Malich E. V. [Comparison of aeration tank calculations using ASM2d and ATV models]. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaia Tekhnika*, 2021, no. 7, pp. 13–22. (In Russian).
5. Khar'kina O. V. [Method of calculating biological treatment facilities: comparative analysis]. *Nailuchshchie Dostupnye Tekhnologii Vodosnabzheniia i Vodootvedeniia*, 2021, no. 6, pp. 50–62. (In Russian).
6. Danilovich D. A., Eпов A. N. *Raschet i tekhnologicheskoe proektirovanie protsessov i sooruzhenii udaleniia azota i fosfora iz gorodskikh stochnykh vod* [Calculation and design of the processes of removing nitrogen and phosphorus from municipal wastewater. Moscow, 2020, 225 p.].
7. Moizhes O. V. [Application of the dynamic model «OxiD» for the reconstruction of LWWTf aeration tanks using the technology of biological removal of nitrogen and phosphorus]. Proceedings of WasteTech–2005 International Congress. Moscow, 2005, pp. 112–116. (In Russian).
8. Moizhes O. V. [OxiD dynamic model of wastewater biological treatment facilities]. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaia Tekhnika*, 2008, no. 10, pp. 52–57. (In Russian).
9. Khar'kina O. V., Zakiev R. R. [Achieving the stable quality of effluent at the level of MPC for commercial fishing reservoirs]. Book of reports of International Scientific and Technical Conference Dedicated to the Memory of S. V. Iakovlev, Academician of RAS. – Moscow, 2020, pp. 198–201. (In Russian).
10. Moizhes O. V. [OxiD mathematical model of wastewater treatment processes]. Proceedings of ECWATECH–2004 International Congress, Moscow, 2004, pp. 44–47. (In Russian).
11. Moizhes O. V. [Dynamic modeling of aeration tanks based on the results of their lay out]. Proceedings of ECWATECH–2004 International Congress, Moscow, 2004, pp. 48–52. (In Russian).
12. Moizhes O. V., Shotina K. V. [Dynamic simulation - a promising approach to the design of biological wastewater treatment facilities]. *Ekologiya i Promyshlennost' Rossii*, 2009, no. 2, pp. 10–11. (In Russian).
13. Shvetsov V. N., Morozova K. M., Stepanov S. V. [Designing facilities for municipal and industrial wastewater biological treatment in aeration tanks with nutrients removal]. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaia Tekhnika*, 2018, no. 9, pp. 26–39. (In Russian).
14. Henze M., Gujer W., Mino T., van Loosdrecht V. Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. London, IWA Publishing, 2000. 130 p.
15. Henze M., Laslie Grady Jr. C. P., Gujer W., Marais GvR., Matsuo T. A general model for single-sludge wastewater treatment system. *Water Research*, 1987, no. 21 (5), pp. 505–515.
16. Marais GvR., Ekama G. A. The activated sludge processes. Part 1. Steady state behavior. *Water SA*, 1976, no. 2 (4), pp. 163–200.
17. Gujer W. Design of a nitrifying activated sludge process with the aid of dynamic simulation. *Water Technology*, 1977, no. 9 (2), pp. 323–336.
18. Moizhes O. V. *Razrabotka tekhnologii udaleniia biogenykh elementov iz gorodskikh stochnykh vod s defosfotatsiei v anoksidnykh usloviakh* [Development of a technology for the removal of nutrients from municipal wastewater with dephosphorization under anoxic conditions. Synopsis of a thesis for Ph. D. degree in Engineering. Volgograd, 2013, 136 p.].