

УДК 628.35

DOI 10.35776/VST.2024.09.04

Математическое моделирование процессов очистки сточных вод в аэротенках

С. В. Степанов¹, О. В. Харьковина², П. П. Авдеенков³, М. В. Лазунин⁴, О. С. Пономаренко⁵



С. В. Степанов



О. В. Харьковина



П. П. Авдеенков



М. В. Лазунин



О. С. Пономаренко

¹ Степанов Сергей Валериевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Водоснабжение и водоотведение», Академия строительства и архитектуры, Самарский государственный технический университет 443100, Россия, г. Самара, Молодогвардейская ул., 244, e-mail: stepanovsv3@yandex.ru

² Харьковина Оксана Викторовна, кандидат технических наук, главный технолог, ООО «Архитектура Водных Технологий»; руководитель секции «Отведение и очистка сточных вод» Экспертно-технологического совета РАВВ; член Научно-технического совета ЖКХ Московской области 127591, Россия, Москва, Дубнинская ул., 81А, стр. 14, НИИ Стали, e-mail: okh@watertec.ru

³ Авдеенков Павел Павлович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Водоснабжение и водоотведение», Академия строительства и архитектуры, Самарский государственный технический университет 443100, Россия, г. Самара, Молодогвардейская ул., 244, e-mail: avdeenko@pp@mail.ru

⁴ Лазунин Максим Владимирович, программист, ООО «Экосмарт» 443036, Россия, г. Самара, ул. Набережная реки Самары, 1, e-mail: stepanovaee@inbox.ru

⁵ Пономаренко Ольга Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Водоснабжение и водоотведение», Академия строительства и архитектуры, Самарский государственный технический университет 443100, Россия, г. Самара, Молодогвардейская ул., 244, e-mail: olga_solkina@mail.ru

Для цитирования: Степанов С. В., Харьковина О. В., Авдеенков П. П., Лазунин М. В., Пономаренко О. С. Математическое моделирование процессов очистки сточных вод в аэротенках // Водоснабжение и санитарная техника. 2024. № 9. С. DOI: 10.35776/VST.2024.09.04.

Разработан новый вариант математической модели процессов очистки сточных вод в аэротенках с биологическим удалением азота и биолого-химическим удалением фосфора на основе взаимного дополнения методик ВОДГЕО/СамГТУ и ASM2d. Математически решена «обратная задача» технологического расчета аэротенков — определение концентраций загрязнений в очищенной воде при имеющихся данных по качественному и количественному составу исходной воды для заданных значений технологических и конструктивных параметров сооружений. Разработан алгоритм выдачи количественных технологических рекомендаций. На основании проведенных исследова-

ний разработано программное обеспечение «Потенциал», предназначенное для сбора исходных данных, выполнения технологических расчетов и выдачи рекомендаций персоналу очистных сооружений. Внедрение программного обеспечения позволит снизить эксплуатационные затраты за счет оптимизации технологического режима работы сооружений биологической очистки сточных вод в минимальные сроки.

Ключевые слова: сточные воды, биологическая очистка, кинетические константы, расчет аэротенков, методика ВОДГЕО/СамГТУ, модель ASM2d, формулы ферментативной кинетики, математическое моделирование.

Исследование выполнено в рамках Договора № 4951ГС1/85526 с Федеральным государственным бюджетным учреждением «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере».

Mathematical simulation of wastewater treatment processes in aeration tanks

S. V. Stepanov¹, O. V. Khar'kina², P. P. Avdeenkov³, M. V. Lazunin⁴, O. S. Ponomarenko⁵

¹ Stepanov Sergei, Doctor of Engineering, Professor, Water Supply and Wastewater Disposal Department, Academy of Civil Engineering and Architecture, Samara State Technical University
244 Molodogvardeiskaia St., Samara, 443100, Russian Federation, e-mail: stepanovsv3@yandex.ru

² Khar'kina Oksana, Ph. D. (Engineering), Chief Process Engineer, «Architecture of Water Technologies», LLC; Head of the Section «Wastewater disposal and treatment» of the RAWW Expert and Technological Council; Member of the Scientific and Technical Council of the Housing and Utilities Sector of the Moscow Region
Research Institute of Steel, 81A Block 14, Dubninskaia St., Moscow, 127591, Russian Federation, e-mail: okh@watertec.ru

³ Avdeenkov Pavel, Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Water Supply and Wastewater Disposal Department, Academy of Civil Engineering and Architecture, Samara State Technical University
244 Molodogvardeiskaia St., Samara, 443100, Russian Federation, e-mail: avdeenkovpp@mail.ru

⁴ Lazunin Maksim, Programmer, Ekosmart LLC
1 Samara River Emb., Samara, 443036, Russian Federation, e-mail: stepanovaee@inbox.ru

⁵ Ponomarenko Ol'ga, Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Water Supply and Wastewater Disposal Department, Academy of Civil Engineering and Architecture, Samara State Technical University
244 Molodogvardeiskaia St., Samara, 443100, Russian Federation, e-mail: olga_solkina@mail.ru

For citation: Stepanov S. V., Khar'kina O. V., Avdeenkov P. P., Lazunin M. V., Ponomarenko O. S. Mathematical simulation of wastewater treatment processes in aeration tanks. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaya Tekhnika*, 2024, no. 9, pp. DOI: 10.35776/VST.2024.09.04. (In Russian).

A new version of the mathematical model of wastewater treatment processes in aeration tanks with biological nitrogen removal and biological-chemical phosphorus removal has been developed based on the mutual complementation of the VODGEO/SamGTU and ASM2d methods. The «inverse problem» of technological calculation of aeration tanks has been solved mathematically, i. e. by determining the pollution concentrations in effluent with available data on the qualitative and quantitative composition of the raw wastewater for the specified values of process and design parameters of the facilities. An algorithm for providing quantitative process recommendations has been developed. Following the conducted research, the Potential software was developed designed for the primary acquisition, technological calculations and providing recommendations to the personnel of the treatment facilities. The implementation of the software will reduce the operating costs by optimizing the process flow pattern of the biological wastewater treatment facilities in the shortest possible time.

Key words: wastewater, biological treatment, kinetic constants, calculation of aeration tanks, VODGEO/SamGTU method, ASM2d model, formulas of enzymatic kinetics, mathematical simulation.

The study was carried out within the framework of Agreement No. 4951GS1/85526 with the Federal State Budgetary Institution «Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises in Science and Technology».

Введение

Одними из основных причин недостижения стабильного нормативного качества очищенной сточной воды являются ошибки при проектировании и неэффективная эксплуатация очистных сооружений [1]. При этом наиболее сложным для проектирования и эксплуатации является блок биологической очистки [2].

Для технологического расчета сооружений биологической очистки сточных вод предложено несколько методик расчета [3–5], при этом ответственность за достижение требуемого качества очищенной сточной воды несет специалист, который ее применяет [6]. На наш взгляд, для снижения рисков недостижения стабильного качества очищенной сточной воды следует применять теоретические методики (модели), которые основаны на фундаментальных закономерностях ферментативной кинетики. Отметим, что все указанные методики направлены

на решение «прямой задачи» (проектной), когда требуется определить параметры аэротенков при известном качественном и количественном составе исходных и очищенных сточных вод. Решая «обратную задачу» (эксплуатационную), требуется определить концентрации загрязнений в очищенных сточных водах при имеющихся конструктивных размерах аэротенков и вторичных отстойников, при установленных значениях технологических параметров для определенного качества и количества поступающих исходных сточных вод.

Безусловно, такой расчет можно выполнить по имеющимся «прямым» моделям методом подбора, но это является архаичным и трудозатратным подходом. Решение «обратной задачи» представляется крайне полезным при моделировании работы вновь спроектированных и реконструированных очистных сооружений и их

эксплуатации. Более того, исходя из «обратной задачи», могут быть определены необходимые значения технологических параметров, которые позволят получить требуемое качество очищенных сточных вод.

Эксплуатация канализационных очистных сооружений (КОС) требует от технологов высокой квалификации и знаний, как теоретических основ биохимических процессов, так и особенностей технических и конструктивных решений конкретных сооружений [7]. Современные сооружения биологической очистки представляют собой сложный комплекс технологических элементов различного назначения, их эффективная работа во многом зависит от решений, принимаемых технологом. Основой эффективной эксплуатации сооружений очистки сточных вод является грамотное и оперативное принятие технологических решений в реальных условиях работы при непрерывно меняющемся составе поступающих сточных вод [8].

При реконструкции очистных сооружений, как правило, меняется технология очистки сточных вод, например, реализуется биологическое удаление азота и фосфора. Для принятия правильных решений в конкретной ситуации необходим практический опыт эксплуатации сооружений, работающих по новой технологии, которого часто не хватает. Получаемые при решении «обратной задачи» значения технологических параметров могут послужить основой для правильных решений, принимаемых технологом.

Цель работы — разработать математическую модель и основанное на ней программное обеспечение (ПО), позволяющее рассчитывать концентрации загрязнений в очищенной сточной воде при имеющемся качественном и количественном составе исходных сточных вод, а также при известных технологических параметрах работы аэротенков и вторичных отстойников, сравнивать их с нормативными требованиями и при несоответствии выдавать технологу количественные рекомендации по внесению изменений в технологический режим работы очистных сооружений.

Применение математической модели для решения «прямой задачи» (проектной)

В Российской Федерации для расчета сооружений биологической очистки сточных вод получили распространение две теоретические модели, основанные на уравнениях ферментативной кинетики: ASM2d [9] и ВОДГЕО/СамГТУ [5]. При сравнении расчетов по ним были получены близкие результаты [10]. В настоящей ра-

боте предложена разработанная авторами статьи обновленная модель, дополняющая обе методики. Ниже приведены основные принципы расчетов по этой модели.

Продолжительность пребывания сточных вод в анаэробной зоне, ч, предлагается определять по объемной скорости потребления ацетата [9]:

$$T_{\text{анаэр}} = \frac{24(S_{\text{HAc.вх}} - S_{\text{HAc.вых}})}{k_p S_{\text{HAc.вых}} e^{\chi_{\text{HAc}}(t-20)} \frac{S_{\text{HAc.вых}}}{S_{\text{HAc.вых}} + K_{\text{HAc}}}}, \quad (1)$$

где $S_{\text{HAc.вх}}$ и $S_{\text{HAc.вых}}$ — ХПК ацетата на входе и выходе из анаэробной зоны, мг/л; k_p — константа потребления ацетата в анаэробной зоне, г/(м³·сут), при 20 °С; K_{HAc} — константа насыщения по ацетату, мг/л; χ_{HAc} — температурная константа потребления ацетата, °С⁻¹; t — температура иловой смеси, °С.

Данный подход уже был использован ранее в обновленной методике ВОДГЕО/СамГТУ [11].

Удельную скорость денитрификации было решено определять через скорость роста соответствующих микроорганизмов. После ряда преобразований формул методики ASM [9] получено, гN–NO₃/(л·сут):

$$\rho_{\text{ден}} = \frac{1}{Y_D} \left(\mu_{\text{max},D,20} \frac{N_{\text{NO}_3\text{вых}}}{K_{s,\text{NO}_3} + N_{\text{NO}_3\text{вых}}} \cdot \frac{L_{\text{ден}}}{L_{\text{ден}} + K_{s,\text{БПК}}} \times \right. \\ \left. \times \frac{K_{s,\text{O}_2,\text{NO}_3}}{K_{s,\text{O}_2,\text{NO}_3} + C_{\text{O,анокс}}} - b_{D,20} \right) e^{\chi_{\text{ден}}(t-20)} k_{\text{ХПК}_B}, \quad (2)$$

где Y_D — коэффициент прироста денитрифицирующей биомассы, ХПК биомассы/гN–NO₃; $\mu_{\text{max},D,20}$ — максимальная скорость роста денитрификаторов при 20 °С, сут⁻¹; $N_{\text{NO}_3\text{вых}}$ — концентрация азота нитратов в очищенной сточной воде, мг/л; K_{s,NO_3} — константа полунасыщения по N–NO₃, мгN/л; $L_{\text{ден}}$ — БПК₅ на выходе из аноксидной зоны с учетом разбавления циркуляционными потоками, мг/л; $K_{s,\text{БПК}}$ — константа полунасыщения по органическим веществам, мгБПК₅/л; $K_{s,\text{O}_2,\text{NO}_3}$ — константа полунасыщения по кислороду для денитрификации, мг/л; $C_{\text{O,анокс}}$ — средняя концентрация растворенного кислорода в аноксидной зоне аэротенка, мг/л; $b_{D,20}$ — скорость распада денитрифицирующих микроорганизмов при 20 °С, сут⁻¹; $\chi_{\text{ден}}$ — температурная константа денитрификации, °С⁻¹; $k_{\text{ХПК}_B}$ — коэффициент перевода массовой концентрации активного ила в единицы ХПК, г/г беззольного вещества активного ила.

Первоначально значения кинетических констант и коэффициентов для расчета по методике ASM2d могут быть приняты по литературным

данным, например [8; 12; 13], и в дальнейшем подлежат уточнению в процессе верификации модели на конкретном объекте.

Формула (2) позволила **учесть снижение скорости денитрификации при наличии растворенного кислорода** в аноксидной зоне, что является **необходимым условием получения корректных данных**. В остальном формула близка (при перемножении дробей и **перевода скорости роста микроорганизмов в скорость потребления нитратов**) к соответствующему выражению в методике ВОДГЕО/СамГТУ [5].

Тогда расчетная продолжительность пребывания сточных вод в аноксидной зоне, ч, составит:

$$T_{\text{анокс}} = \frac{24(N_{\text{TKN}_{\text{вх}}} + N_{\text{NO}_2\text{вх}} + N_{\text{NO}_3\text{вх}} - N_{\text{NO}_3\text{вых}} - N_{\text{NH}_4\text{вых}} - N_{\text{NO}_2\text{вых}} - N_{\text{пр}})}{1000\rho_{\text{ден}}a_i(1-s)}, \quad (3)$$

где $N_{\text{TKN}_{\text{вх}}}$, $N_{\text{NO}_2\text{вх}}$ и $N_{\text{NO}_3\text{вх}}$ – концентрации общего азота по Кьейдалю, азота нитритов и азота нитратов в осветленной сточной воде, мг/л; $N_{\text{NH}_4\text{вых}}$ и $N_{\text{NO}_3\text{вых}}$ – концентрация азота аммонийного и азота нитратов в очищенной воде, мг/л; $N_{\text{пр}}$ – потребление азота на прирост активного ила, мг/л; a_i – концентрация активного ила, г/л; s – зольность активного ила, доли единицы.

Продолжительность пребывания сточных вод в аэробной зоне предлагается определять как большее значение из расчетного времени окисления органических веществ и нитрификации. Для расчета удельной скорости окисления органических веществ в аэробной зоне, мгБПК₅/(г·ч), использована формула:

$$\rho_{\text{БПК}} = \frac{\rho_{\text{мах,БПК}}L_{\text{вых}}}{L_{\text{вых}} + K_{\text{м,БПК}}} \cdot \frac{e^{\chi_{\text{г}}(t-20)}}{1+a_i\varphi} \cdot \frac{C_0}{C_0 + K_{\text{О}}}, \quad (4)$$

где $\rho_{\text{мах,БПК}}$ – максимальная удельная скорость окисления органических веществ, мгБПК₅/(г·ч); $L_{\text{вых}}$ – БПК₅ очищенной воды, мг/л; $K_{\text{м,БПК}}$ – константа Михаэлиса, мг/л; $\chi_{\text{г}}$ – температурная константа гетеротрофного процесса, °C⁻¹; φ – коэффициент ингибирования продуктами метаболизма активного ила, л/г; C_0 – средняя концентрация растворенного кислорода в аэробной зоне аэротенка, мг/л; $K_{\text{О}}$ – константа полунасыщения по кислороду, мг/л.

Тогда продолжительность аэробного гетеротрофного процесса, ч, вычисляется по формуле:

$$T_{\text{БПК}} = \frac{L_{\text{аэр}} - L_{\text{вых}}}{a_i(1-s)\rho_{\text{БПК}}}, \quad (5)$$

где $L_{\text{аэр}}$ – БПК₅ на входе в аэробную зону, определяется вычитанием из БПК₅ осветленной воды потребления органических веществ в аноксидной зоне, мг/л.

Из формулы (5) определяется объем аэробной зоны для обеспечения требуемого качества очищенной воды по БПК₅. Таким образом, для описания процесса окисления органических веществ в аэробной зоне использованы формулы из методики ВОДГЕО/СамГТУ, однако расчет ведется по БПК₅, а не по БПК_{полн}, так как повсеместно используется именно пятисуточное значение, а между данными показателями обычно имеется прямо пропорциональная зависимость.

Расчет процессов нитрификации предложено проводить как по удельной скорости окисления аммония в соответствии с методикой ВОДГЕО/СамГТУ, так и по **минимальным значениям возраста активного ила первой и второй стадий нитрификации, обеспечивающих требуемое качество очищенной воды по аммонии и нитритам**, как в методике ASM2d. Расчетная продолжительность нитрификации принимается по большему из полученных значений.

Удельная скорость окисления аммония, мг/(г·ч), в методике ВОДГЕО/СамГТУ для удобства экспериментального определения условно отнесена к общей концентрации ила в аэротенке и определяется по формуле:

$$\rho_{\text{нитр}} = \rho_{\text{мах,нитр}} \frac{N_{\text{NH}_4\text{вых}}}{N_{\text{NH}_4\text{вых}} + K_{\text{м,нитр}}} \cdot \frac{e^{\chi_{\text{нитр}}(t-20)}}{1+\varphi a_i} \cdot \frac{C_0}{C_0 + K_{\text{О,нитр}}}, \quad (6)$$

где $\rho_{\text{мах,нитр}}$ – максимальная удельная скорость нитрификации, мгN/(г·ч); $K_{\text{м,нитр}}$ – константа Михаэлиса процесса нитрификации, мгN/л; $\chi_{\text{нитр}}$ – температурная константа нитрификации, °C⁻¹; $K_{\text{О,нитр}}$ – константа полунасыщения по кислороду для нитрификации, мг/л.

Требуемая продолжительность нитрификации по скорости окисления аммония, ч, рассчитывается по формуле:

$$T_{\text{нитр},\rho} = \frac{N_{\text{TKN}_{\text{вх}}} - N_{\text{NH}_4\text{вых}} - N_{\text{пр}}}{\rho_{\text{нитр}}a_i(1-s)}. \quad (7)$$

На основании полученного по формуле (7) значения рассчитывается объем аэробной зоны, определенный через скорость нитрификации, для обеспечения требуемого качества очищенной сточной воды по аммонии. **Минимальный расчетный возраст активного ила, сут, является величиной, обратной скорости роста соответствующей группы микроорганизмов, и может быть выражен для обеих ступеней из известных уравнений кинетики нитрификации [4] в виде следующих формул соответственно для первой и второй ступеней:**

$$\theta_{\text{A1}} = \frac{1}{\frac{\mu_{\text{мах,A1}}N_{\text{NH}_4\text{вых}}}{N_{\text{NH}_4\text{вых}} + K_{\text{s,A1}}} \cdot \frac{C_0}{C_0 + K_{\text{s,O}_2\text{A1}}} \cdot \frac{\text{Щ}_{\text{н}}}{\text{Щ}_{\text{н}} + K_{\text{s,A1k}}} - b_{\text{A1}}}; \quad (8)$$

$$\theta_{A2} = \frac{1}{\frac{\mu_{\max,A2} N_{\text{NO}_2\text{ВЫХ}}}{N_{\text{NO}_2\text{ВЫХ}} + K_{s,A2}} \cdot \frac{C_O}{C_O + K_{s,\text{O}_2A2}} - b_{A2}}, \quad (9)$$

где $\mu_{\max,A1}$ и $\mu_{\max,A2}$ — максимальные скорости роста нитрифицирующих бактерий первой и второй стадий, сут⁻¹; $K_{s,A1}$ и $K_{s,A2}$ — константы полунасыщения по аммонии и нитритам, мг/л; K_{s,O_2A1} и K_{s,O_2A2} — константы полунасыщения по кислороду для первой и второй стадий, мг/л ($K_{s,\text{O}_2A1} = K_{\text{O,нитр}}$); Щ_n — щелочность иловой смеси на выходе из аэротенка с учетом ее повышения в аноксидной зоне и снижения в аэробной зоне, мг-экв/л; $K_{s,\text{Alk}}$ — константа полунасыщения по щелочности, мг-экв/л; b_{A1} и b_{A2} — скорости распада нитрифицирующих бактерий первой и второй стадий, сут⁻¹.

Как указано выше, значения констант первоначально могут быть приняты по литературным данным с последующим уточнением.

Фактический аэробный возраст активного ила, сут, может быть определен по формуле [8; 13; 14]:

$$\theta_{\text{аэр}} = \frac{W_{\text{аэр}} a_i}{\Pi_i}, \quad (10)$$

где $W_{\text{аэр}}$ — объем аэробной зоны, м³; Π_i — прирост активного ила, кг/сут.

Приняв наибольшее значение, полученное по формулам (8) и (9) за требуемый минимальный аэробный возраст ила $\theta_{\text{аэр,min}}$, выразим из формулы (10) требуемый объем аэробной зоны, м³, обеспечивающий расчетное значение аэробного возраста активного ила:

$$W_{\text{аэр},\theta} = \frac{\theta_{\text{аэр,min}} \Pi_i}{a_i}. \quad (11)$$

При этом формула (11) справедлива, когда система находится в равновесии, т. е. когда количество образующихся микроорганизмов равно количеству выводимой из системы биомассы.

Поскольку в методике ВОДГЕО/СамГТУ расчеты ведутся через продолжительность процесса, формулу (11) целесообразно преобразовать:

$$T_{\text{нитр},\theta} Q_{\text{ч}} = \frac{\theta_{\text{аэр,min}} \Pi_i}{a_i}, \quad (12)$$

где $T_{\text{нитр},\theta}$ — требуемая продолжительность нитрификации по возрасту активного ила, ч; $Q_{\text{ч}}$ — расчетный расход сточных вод, м³/ч.

Тогда:

$$T_{\text{нитр},\theta} = \frac{\theta_{\text{аэр,min}} \Pi_i}{Q_{\text{ч}} a_i}. \quad (13)$$

Расчетная продолжительность пребывания в аэробной зоне определяется как большее из зна-

чений, полученных по формулам (5), (7) и (13). При высоких концентрациях соединений азота в исходной воде, лимитирующей, как правило, оказывается формула (7), при низких — формула (5) или (13). Кроме того, совместное использование формул (9) и (11) — (13) позволяет учесть требуемую концентрацию нитритов в очищенной воде.

Применение математической модели для решения «обратной задачи» (эксплуатационной)

Исходные данные для решения «обратной задачи» состоят из четырех блоков: показателей исходной воды, конструктивных характеристик сооружений, технологических параметров и вторичных данных, получаемых расчетом.

В первый блок входят расходы сточных вод — суточный $Q_{\text{сут}}$ и часовой $Q_{\text{ч}}$; концентрации загрязнений в исходных (осветленных) сточных водах, мг/л: БПК₅ — $L_{\text{ВХ}}$, ХПК_{ВХ}, взвешенные вещества $C_{\text{ВХ}}$, аммоний $N_{\text{NH}_4\text{ВХ}}$, нитриты $N_{\text{NO}_2\text{ВХ}}$, нитраты $N_{\text{NO}_3\text{ВХ}}$, фосфаты $P_{\text{PO}_4\text{ВХ}}$; температура t , °С; щелочность Щ , мг-экв/л. Показатели этого блока непрерывно и произвольно изменяются, повлиять на их значения персонал очистных сооружений не может.

Во второй блок конструктивных параметров входят объемы, м³, зон аэротенков — анаэробной $W_{\text{анаэр}}$, аноксидной $W_{\text{анокс}}$, аэробной $W_{\text{аэр}}$; тип вторичных отстойников; суммарная площадь поверхности вторичных отстойников $F_{\text{сс}}$, м²; глубина зоны отстаивания во вторичных отстойниках $H_{\text{сет}}$, м; коэффициент использования объема вторичных отстойников $K_{\text{сс}}$; β -фактор реагентного удаления фосфора. Эта часть данных остается практически неизменной для конкретных сооружений, изменения возникают лишь при выводе части сооружений на ремонт или реконструкцию.

Показатели третьего блока исходных данных — технологические параметры очистных сооружений являются инструментами, с помощью которых персонал управляет их работой. В него входят: концентрация растворенного кислорода в аэробной зоне C_{O} , мг/л; концентрация растворенного кислорода в аноксидной зоне $C_{\text{O,анокс}}$, мг/л; концентрация активного ила в аэротенке a_r , г/л; концентрация избыточного и возвратного активного ила $a_{\text{и}}$, г/л; зольность ила s , доли единицы; иловый индекс J_r , см³/г; расход анаэробного рецикла $Q_{\text{анаэр}}$, м³/ч; расход нитратного рецикла $Q_{\text{нитр}}$, м³/ч; расход возвратного активного ила $Q_{\text{в}}$, м³/ч; расход избыточного активного ила $Q_{\text{и}}$, м³/сут; вид реагента для удаления фосфора и его доза по металлу $D_{\text{Ме}}$, мг/л.

Четвертый блок вторичных исходных данных включает:

продолжительность пребывания сточной воды в отдельных зонах аэротенка, ч:

$$T_{\text{анаэр}} = \frac{24W_{\text{анаэр}}}{Q_{\text{сут}}}; T_{\text{анокс}} = \frac{24W_{\text{анокс}}}{Q_{\text{сут}}}; T_{\text{аэр}} = \frac{24W_{\text{аэр}}}{Q_{\text{сут}}}; \quad (14)$$

общий прирост активного ила, кг/сут:

$$P_{\text{общ}} = Q_{\text{и}} a_{\text{и}} + a_t Q_{\text{сут}} \cdot 10^{-3}, \quad (15)$$

где a_i – концентрация взвешенных веществ в осветленной воде, мг/л;

кратности циркуляционных расходов, доли единицы:

$$R_{\text{анаэр}} = \frac{Q_{\text{анаэр}}}{Q_{\text{ч}}}; R_{\text{нитр}} = \frac{Q_{\text{нитр}}}{Q_{\text{ч}}}; R_i = \frac{Q_{\text{в}}}{Q_{\text{ч}}}; R_{\text{общ}} = R_{\text{нитр}} + R_i. \quad (16)$$

Для решения «обратной задачи», т. е. для определения качества очищенной воды при известных конструктивных и технологических параметрах аэротенков, потребовалось вывести из формул «прямой задачи» концентрации загрязнений на выходе из сооружений биологической очистки. Следует отметить, что известные иностранные программы *BioWin* и *GPS-X* выполняют именно эту функцию.

Ниже, в качестве примера приведены результаты решения «обратной задачи» для первой стадии нитрификации. Концентрация аммония в очищенной воде $N_{\text{NH}_4\text{вых},\theta}$, мг/л, рассчитывается исходя из возраста активного ила по формуле:

$$N_{\text{NH}_4\text{вых},\theta} = \frac{K_{s,\text{Al}}}{\mu_{\text{max},\text{Al}} C_{\text{O}} \prod_{\text{и}} W_{\text{аэр}} a_i} \cdot (1 - \frac{(Q_{\text{и}} a_{\text{и}} + a_t \cdot 10^{-3} \cdot Q_{\text{сут}} + b_{\text{Al}} W_{\text{аэр}} a_i)(C_{\text{O}} + K_{s,\text{O}_2\text{Al}})(\prod_{\text{и}} + K_{s,\text{Alk}})}{1}). \quad (17)$$

Концентрация аммония в очищенной воде $N_{\text{NH}_4\text{вых},\rho}$, мг/л, рассчитывается по удельной скорости окисления:

$$N_{\text{NH}_4\text{вых},\rho} = \frac{-\left(\frac{T_{\text{аэр}}}{Z} - \Delta N + K_{m,\text{нитр}}\right) + \sqrt{\left(\frac{T_{\text{аэр}}}{Z} - \Delta N + K_{m,\text{нитр}}\right)^2 + 4K_{m,\text{нитр}} \Delta N}}{2}, \quad (18)$$

где ΔN – количество азота, которое может быть окислено в процессе нитрификации, мг/л:

$$\Delta N = N_{\text{TKN вх}} - N_{\text{пр}}, \quad (19)$$

где Z – параметр;

$$Z = \frac{(1 + \varphi a_i)(C_{\text{O}} + K_{s,\text{O}_2\text{Al}})}{\rho_{\text{max},\text{нитр}} e^{\chi_{\text{нитр}}(t-20)} C_{\text{O}} a_i (1-s)}. \quad (20)$$

За окончательную концентрацию аммонийного азота в очищенной воде принимается большее из значений, полученных по формулам (17) и (18).

Аналогичные математические преобразования выполнены для всех процессов, входящих в «прямую задачу».

Отметим, что значительную сложность в решении «обратной задачи» представляют циклические расчеты, которые включают формулы, зависящие друг от друга, образуя замкнутый цикл (упрощенно: 1 зависит от 2, которая зависит от 3, которая зависит от 1). Например, анализ формул (15), (17) и (18) показывает, что они включают неизвестные величины – результаты расчета: a_i и $N_{\text{пр}}$. Реализация «обратной задачи» в среде *Microsoft Office Excel* оказалась весьма затруднительной, несмотря на то, что возможность работы с циклическими ссылками за счет итеративных расчетов в ней предусмотрена. Однако из-за большого количества циклических ссылок при определенных сочетаниях исходных данных отмечалась некорректная работа *Excel*. Для возможности успешного осуществления таких расчетов в каждом цикле были установлены стартовые точки, в качестве которых были выбраны нормативные значения качества очищенной воды.

Программное обеспечение для предоставления технологических рекомендаций

Разработанный математический аппарат был использован для создания программного обеспечения «Потенциал – ПОмощник ТExНолога – ЦИфровая АЛьтернатива». Программа написана на языке программирования *Python*, что связано с планируемым расширением функционала, в том числе с использованием технологий искусственного интеллекта. Разработанное ПО осуществляет сбор информации о количественном и качественном составе сточных вод и технологических параметрах с имеющихся на очистных сооружениях приборов учета и электронных журналов (*Microsoft Office Excel* и/или другие базы данных).

Интерфейс ПО включает блоки «Вода, поступающая в аэротенк», «Технологические параметры», «Конструктивные параметры сооружения», «Кинетические константы», «Выходные параметры» и «Качество очищенной воды» (рис. 1). При нажатии на кнопку «Рассчитать» ПО определяет расчетные концентрации азота аммонийного, азота нитритов и нитратов, БПК, взвешенных веществ и фосфора фосфатов в очищенной воде и сравнивает их с нормативными значениями. Показатели, находящиеся в преде-

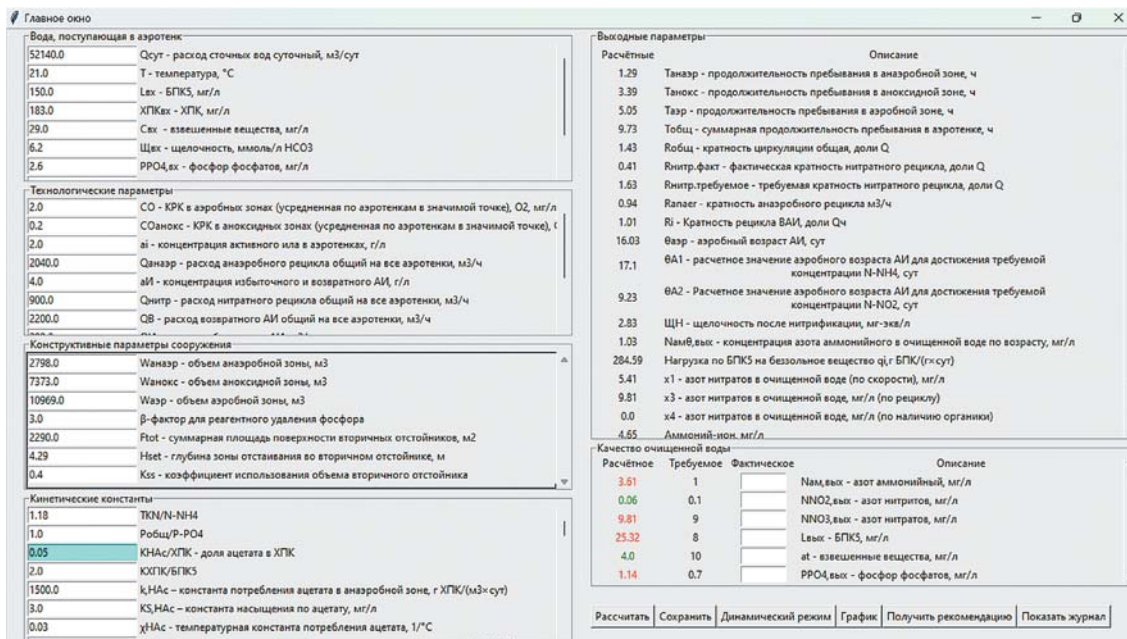


Рис. 1. Интерфейс ПО «Потенциал»

лах установленных нормативных значений, выводятся шрифтом зеленого цвета, превышающие нормативы – красного.

В функционал ПО «Потенциал» включена система выдачи количественных и качественных технологических рекомендаций. При наличии превышений концентраций загрязнений в очищенной воде, после нажатия кнопки «Получить рекомендацию», программа выдает рекомендации по изменению технологических параметров работы очистных сооружений: концентрации растворенного кислорода, концентрации активного ила, расхода нитратного рецикла, расхода избыточного и возвратного активного ила, дозы реагента (рис. 2).

Определение необходимых значений технологических параметров для выдачи рекомендаций ПО осуществляет с использованием того же математического аппарата «обратной задачи», что и при первичном расчете. При этом поиск требуемых величин осуществляется методом пошагового подбора (в основном, увеличения) значений технологических параметров, которые программа рекомендует изменить. При этом параметры ограничены четырьмя уровнями (второй нижний, первый нижний, первый верхний, второй верхний), значения которых зависят от применяемой технологии, экономической целесообразности и т. д. Если результат зависит от двух параметров, например от концентрации

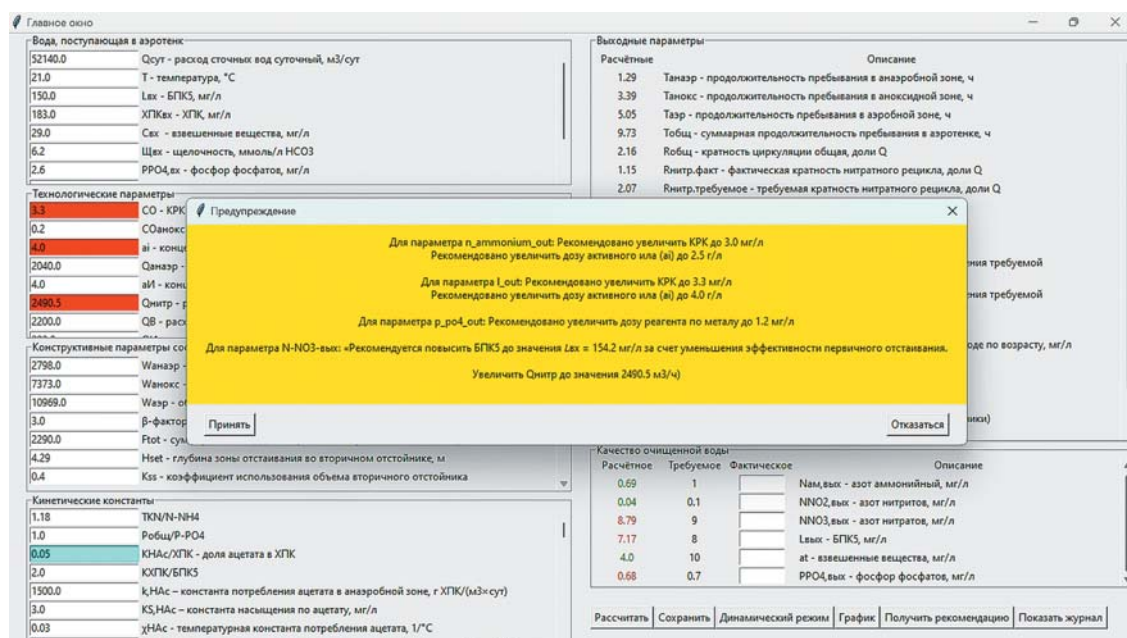


Рис. 2. Пример выдачи технологических рекомендаций

растворенного кислорода и дозы ила, то подбор проводится сначала в пределах первого уровня по первому показателю, затем по второму. Если требуемое качество не обеспечивается в пределах первого уровня, осуществляется переход ко второму уровню.

Выдачу технологических рекомендаций ПО может осуществлять по двум сценариям — штатному и нештатному. Если в результате расчетов хотя бы один из показателей качества очищенной воды превышает требуемое значение, программа позволяет определить скорректированные значения технологических параметров, обеспечивающие выполнение нормативов по каждому показателю, концентрация которого была превышена, выдает отдельные рекомендации по каждому из этих показателей, указывая рекомендуемые значения соответствующих технологических параметров. Если по двум и более загрязняющим веществам требуется изменение одних и тех же технологических параметров, то выполняется пересчет для больших значений технологических параметров, обеспечивающих одновременное достижение требуемых концентраций. Эти значения отражаются в блоке «Технологические параметры» на красном фоне (рис. 2). Если в результате перерасчета сооружений при рекомендованных значениях технологических параметров ни один из показателей качества очищенной воды не превышает нормативные требования — это работа по штатному сценарию. Всплывающее окно рекомендаций при этом имеет желтый цвет.

Если для какого-то показателя качества очищенной воды на данных сооружениях в сложившейся ситуации невозможно добиться выполнения нормативных требований в рамках установленных граничных условий, то программа выставляет соответствующие значения технологических параметров равными границам второго уровня. Затем выполняется расчет сооружений с определением минимально возможных, в данном случае концентраций загрязнений в очищенной воде. Это нештатный режим, окно рекомендаций имеет красный фон (на рисунках данная ситуация не показана).

Генерируемые программным обеспечением рекомендации позволяют скорректировать работу аэротенков таким образом, чтобы в существующих объемах сооружений при текущих качественных и количественных показателях сточной воды добиться максимально возможной эффективности очистки. Программное обеспечение позволяет определить оптималь-

ные технологические параметры при изменении качественного и количественного состава сточных вод на входе в очистные сооружения, т. е. принять превентивные меры до фактического изменения качественного состава очищенных сточных вод, что позволяет снизить плату за загрязнение окружающей среды. Выдаваемые программным обеспечением рекомендации позволяют уменьшить эксплуатационные затраты при избыточной концентрации растворенного кислорода, повышенной дозе реагента и т. д. за счет перевода соответствующей части технологического оборудования в более экономичный режим работы. Данные рекомендации являются уникальной функцией, аналогов которой в других ПО нет.

Разработанное ПО позволяет построить графики динамики изменения всех показателей, участвующих в расчете. При нажатии на кнопку «График» в правом нижнем углу интерфейса программы (рис. 1 и 2) открывается страница выбора показателей, по которым требуется получить графические зависимости. Данную опцию удобно использовать для анализа путей решения возникших технологических задач. На рис. 3, а в качестве примера смоделирована ситуация превышения расчетной концентрации азота нитритов (0,14 мг/л) по сравнению с требуемой (0,1 мг/л). При этом доза активного ила первоначально составляла 2 г/л, концентрация растворенного кислорода (КРК) — 2 мг/л, минимальный аэробный возраст активного ила для достижения концентрации азота нитритов 0,1 мг/л — 21,6 сут, расчетный аэробный возраст (фактический) — 15,5 сут (рис. 3, б).

Для достижения требуемой концентрации азота нитритов ПО выдало следующие рекомендации: увеличить КРК до второго верхнего уровня 4 мг/л и увеличить дозу ила до 2,3 г/л. Увеличить КРК можно практически мгновенно, а наращивание дозы ила требует значительного времени. После выполнения рекомендаций по увеличению КРК требуемый возраст снижается до 17,4 сут (19.06.2024), и при постепенном увеличении дозы ила значения фактического и минимального возраста ила сравниваются, в результате чего концентрация нитритов в очищенной сточной воде достигает требуемого значения 0,1 мг/л (21.06.2024). Поскольку поддерживать КРК на уровне 4 мг/л экономически нецелесообразно, далее необходимо ее постепенно уменьшать до 2 мг/л, а дозу ила увеличивать, в данном случае до 2,7 г/л при сохранении концентрации нитритов в очищенной воде 0,1 мг/л.

Работа ПО предусмотрена в двух режимах: статическом и динамическом. Статический режим предусматривает одномоментный расчет качества очищенной воды на КОС при известном качестве поступающей сточной воды и установленных персоналом значениях технологических параметров, которые принимаются неизменными в период протекания очищаемой сточной воды по сооружениям. В этом случае необходимо учитывать, что продолжительность биологической очистки составляет от нескольких часов до суток, а в некоторых случаях и более, поэтому между начальным состоянием (исходная вода) и конечным состоянием (очищенная вода) имеется соответствующий интервал времени.

Динамический режим предусматривает расчет качества очищенной воды с заданным шагом моделирования (по умолчанию 1 час) в течение выбранного периода моделирования T при известном качестве поступающей сточной воды и установленных персоналом значениях технологических параметров, которые частично изменяются вследствие изменения количества биомассы в системе в результате ее прироста в процессах биологической очистки, выноса из системы с очищенной водой и принудительного удаления избыточного ила.

С учетом того, что ПО описывает работу конкретных КОС, на каждом объекте требуется верификация математической модели за счет корректировки значений кинетических констант и коэффициентов, а также настройка системы сбора данных с учетом особенностей схемы блока биологической очистки. В настоящее время проводится отладка работы ПО в режиме пробной эксплуатации на городских очистных канализационных сооружениях (ГОКС) г. Самары совместно с ООО «Самарские коммунальные системы», о чем планируется сообщить в одном из номеров журнала.

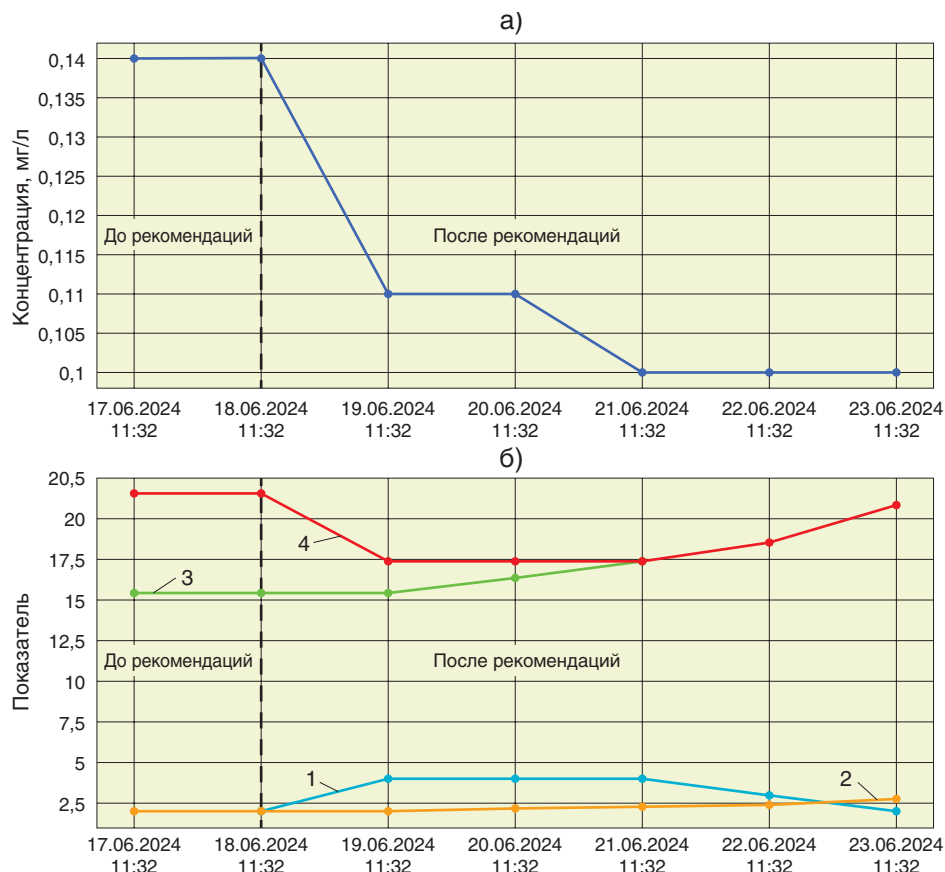


Рис. 3. Пример построения графиков

а – динамика изменения концентрации азота нитритов $N_{\text{NO}_2\text{Вых}}$, мг/л; б – динамика изменения: 1 – концентрации растворенного кислорода C_{O} , мг/л; 2 – дозы активного ила a_r , г/л; 3 – минимального аэробного возраста ила для второй ступени нитрификации θ_{A2} , сут; 4 – расчетное значение фактического аэробного возраста активного ила $\theta_{\text{расч}}$, сут

Выводы

1. Разработан новый вариант математической модели, описывающей процессы биологической очистки сточных вод в аэротенках с биологическим удалением азота и биолого-химическим удалением фосфора. Новый вариант основан на известных теоретических моделях ASM2d и ВОДГЕО/СамГТУ. Данный математический аппарат позволяет рассчитать качество очищенной воды при известном качественном и количественном составе исходных сточных вод, а также при известных технологических и конструктивных параметрах аэротенков.

2. Разработано новое программное обеспечение «Потенциал – ПОмощник ТExНолога – ЦИфровая АЛьтернатива», которое в статическом и динамическом режимах моделирует работу аэротенков с определением расчетных концентраций загрязнений в очищенной воде по ХПК, БПК₅, взвешенным веществам, соединениям азота и фосфора. При наличии превышений этих значений, по сравнению с нормативными показателями, производится выдача рекомендаций по изменению технологических параметров работы

очистных сооружений: концентрации растворенного кислорода, дозы ила, расхода нитратного рецикла, расхода избыточного и возвратного активного ила, дозы реагента.

3. Рекомендации, выдаваемые ПО «Потенциал», позволяют скорректировать работу сооружений таким образом, чтобы в существующих

объемах аэротенков добиться максимально возможной эффективности очистки сточных вод. Это дает возможность снизить плату за загрязнение окружающей среды и сократить эксплуатационные затраты за счет оптимизации технологического режима работы очистных сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Харькина О. В. Как добиться требуемого качества очищенной воды на КОС // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. 2024. № 1. С. 36–39.
Khar'kina O. V. [How to achieve the required quality of effluent at wastewater treatment facilities]. *Nailuchshie Dostupnye Tekhnologii Vodospabzheniia i Vodootvedeniia*, 2024, no. 1, pp. 36–39. (In Russian).
2. Пупырев Е. И., Харькина О. В. Пути обеспечения эффективной очистки сточных вод // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. 2020. № 5. С. 54–63.
Pupyrev E. I., Khar'kina O. V. [Ways to ensure efficient wastewater treatment]. *Nailuchshie Dostupnye Tekhnologii Vodospabzheniia i Vodootvedeniia*, 2020, no. 5, pp. 54–63. (In Russian).
3. 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.
Danilovich D. A., Epov A. N. *Raschet i tekhnologicheskoe proektirovanie protsessov i sooruzhenii udaleniia azota i fosfora iz gorodskikh stochnykh vod* [Calculation and technological design of processes and facilities for removing nitrogen and phosphorus from municipal wastewater. Moscow, 2020, 225 p.].
4. Henze M., Gujer W., Mino T., van Loosdrecht M. Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2s and ASM3. London, 2000. DOI: 10.2166/9781780402369.
5. 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. 26–38.
Shvetsov V. N., Morozova K. M., Stepanov S. V. [Designing facilities for municipal and industrial wastewater biological treatment in aeration tanks with nutrients removal]. *Vodospabzhenie i Sanitarnaia Tekhnika*, 2018, no. 9, pp. 26–38. (In Russian).
6. Харькина О. В., Степанов С. В. Анализ моделей и методик расчета аэротенков // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. 2023. № 2. С. 30–41.
Khar'kina O. V., Stepanov S. V. [Analysis of the aeration tank models and calculation methods]. *Nailuchshie Dostupnye Tekhnologii Vodospabzheniia i Vodootvedeniia*, 2023, no. 2, pp. 30–41. (In Russian).
7. Харькина О. В., Харькин С. В. Проблемы эксплуатации сооружений очистки сточных вод и их решения: вспухание и пенообразование активного ила // Справочник эколога. 2015. № 2. С. 85–96.
Khar'kina O. V., Khar'kin S. V. [Problems and solutions in the operation of wastewater treatment facilities: activated sludge bulking and scumming]. *Spravochnik Ekologa*, 2015, no. 2, pp. 85–96. (In Russian).
8. Харькина О. В. Эффективная эксплуатация и расчет сооружений биологической очистки сточных вод. — Волгоград: Панорама, 2015. 433 с.
Khar'kina O. V. *Effektivnaia ekspluatatsiia i raschet sooruzhenii biologicheskoi ochistki stochnykh vod* [Effective operation and calculation of the biological wastewater treatment facilities. Volgograd, Panorama Publ., 2015, 433 p.].
9. Henze Mogens, Gujer Willi, Mino Takahashi, Matsuo Tomonori, Wentzel Mark C., Gerrit v. R. Marais, Van Loosdrecht Mark C. M. Activated Sludge Model No.2d, ASM2D. *Water Science Technology*, 1999, v. 39 (1), pp. 165–182.
10. Швецов В. Н., Степанов С. В., Харькина О. В. Сравнение результатов расчета аэротенков по моделям НИИ ВОДГЕО/СамГТУ и ASM2d // Водоснабжение и санитарная техника. 2021. № 5. С. 18–29. DOI: 10.35776/VST.2021.05.02.
Shvetsov V. N., Stepanov S. V., Khar'kina O. V. [Comparison of the calculation results for aeration tanks using the NII VODGEO/SamGTU and ASM2d models]. *Vodospabzhenie i Sanitarnaia Tekhnika*, 2021, no. 5, pp. 18–29. DOI: 10.35776/VST.2021.05.02. (In Russian).
11. Степанов С. В. Технологический расчет аэротенков и мембранных биореакторов: учебное пособие. — М.: Издательство АСВ, 2020. 224 с.
Stepanov S. V. *Tekhnologicheskii raschet aerotנקov i membrannykh bioreaktorov: uchebnoe posobie* [Process calculation of aeration tanks and membrane bioreactors: a study guide. Moscow, ASV Publ., 2020, 224 p.].
12. Хенце М., Армозс П. и др. Очистка сточных вод. Биологические и химические процессы / перевод с английского. — М.: Мир, 2004. 480 с.
Henze M., Harremoës P., et al. *Ochistka stochnykh vod. Biologicheskii i khimicheskie protsessy* [Wastewater treatment. Biological and chemical processes. Moscow, Mir Publ., 2004, 480 p.].
13. Лондонг Й. Очистка сточных вод / перевод с немецкого. — СПб.: Новый журнал, 2013. 496 с.
Longdong J. *Ochistka stochnykh vod* [Abwasserbehandlung. Translated from German. Saint-Petersburg, Novyi Zhurnal Publ., 2013, 496 p.].
14. Технический справочник по обработке воды Degrémont: в 2 т. — СПб.: Новый журнал, 2007. 1696 с.
Tekhnicheskii spravochnik po obrabotke vody Degrémont [Water Treatment Technical Handbook Degrémont. In 2 v. Novyi Zhurnal Publ., 2007, 1696 p.].