

Результаты математического моделирования процессов очистки сточных вод в аэротенках на ГОКС г. Самары в период реконструкции и пусконаладочных работ

**С. В. Степанов¹, Ю. А. Егорова², О. В. Харьковина³, П. П. Авдеенков⁴, О. И. Нестеренко⁵,
М. В. Лазунин⁶, Т. А. Стрелкова⁷, И. Д. Злобин⁸**



С. В. Степанов



Ю. А. Егорова



О. В. Харьковина



П. П. Авдеенков



О. И. Нестеренко



М. В. Лазунин



Т. А. Стрелкова



И. Д. Злобин

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 Егорова Юлия Анатольевна, директор по качеству, ООО «Самарские коммунальные системы» 443056, Россия, г. Самара, ул. Луначарского, 56, e-mail: yegorova@samcomsys.ru

³ Харьковина Оксана Викторовна, кандидат технических наук, главный технолог, ООО «Архитектура Водных Технологий»; руководитель секции «Отведение и очистка сточных вод» Экспертно-технологического совета РАВВ; член НТС ЖКХ Московской области 127591, Россия, Москва, Дубнинская ул., 81А, стр. 14, НИИ Стали, e-mail: okh@watertec.ru

⁴ 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: avdeykovpp@mail.ru

⁵ Нестеренко Ольга Игоревна, ведущий инженер Управления главного технолога, ООО «Самарские коммунальные системы»; аспирант кафедры «Водоснабжение и водоотведение», Академия строительства и архитектуры, Самарский государственный технический университет 443056, Россия, г. Самара, ул. Луначарского, 56, e-mail: onesterenko@samcomsys.ru

⁶ Лазунин Максим Владимирович, программист, ООО «ЭкоСмарт» 443036, Россия, г. Самара, ул. Набережная реки Самары, 1, комн. 118, e-mail: artseven@mail.ru

⁷ Стрелкова Татьяна Александровна, руководитель группы Управления главного технолога, ООО «Самарские коммунальные системы» 443056, Россия, г. Самара, ул. Луначарского, 56, e-mail: tStrelkova@samcomsys.ru

⁸ Злобин Иван Дмитриевич, ведущий технолог Городских очистных канализационных сооружений, ООО «Самарские коммунальные системы» 443056, Россия, г. Самара, ул. Луначарского, 56, e-mail: iZlobin@samcomsys.ru

Для цитирования: Степанов С. В., Егорова Ю. А., Харькина О. В., Авдеенков П. П., Нестеренко О. И., Лазунин М. В., Стрелкова Т. А., Злобин И. Д. Результаты математического моделирования процессов очистки сточных вод в аэротенках на ГОКС г. Самары в период реконструкции и пусконаладочных работ // Водоснабжение и санитарная техника. 2024. № 11. С. 24–31. DOI: 10.35776/VST.2024.11.03.

Представлены результаты математического моделирования работы реальных сооружений биологической очистки сточных вод с применением программного обеспечения «ПОТЕНЦИАЛ», которое использовалось в течение 10 месяцев для оптимизации работы аэротенков в период реконструкции и пусконаладочных работ. Сопоставлены данные о количественном и качественном составе сточных вод, поступающих в аэротенки, принятых в проекте, с фактическими данными за период 2023–2024 годов. Расчет фактических значений прироста и аэробного возраста активного ила по формулам, заложенным в ПО «ПОТЕНЦИАЛ», показал, что стабильное требуемое качество очищенных сточных вод по аммонии и нитритам наблюдалось при аэробном возрасте активного ила 24,1–27 сут и температуре сточных вод 19,1–

24,8 °C, когда концентрация $N-NH_4$ составила менее 1 мг/л, а $N-NO_2$ — менее 0,1 мг/л. В результате калибровки и верификации заложенной в программном обеспечении «ПОТЕНЦИАЛ» математической модели подобраны значения кинетических констант и коэффициентов для отдельной технологической линии «аэротенк № 7 — вторичный отстойник № 5», которые позволили спрогнозировать работу аэротенков с высокой степенью точности (отклонения расчетных и фактических данных составили менее 8%).

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

Исследование выполнено с использованием программного обеспечения, созданного в рамках Договора № 4951ГС1/85526 между ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» и ООО «ЭкоСмарт».

Results of the mathematical simulation of wastewater treatment processes in aeration tanks at the Samara Municipal Wastewater Treatment Facilities during the upgrade and commissioning

S. V. Stepanov¹, Iu. A. Egorova², O. V. Khar'kina³, P. P. Avdeenkov⁴, O. I. Nesterenko⁵, M. V. Lazunin⁶, T. A. Strelkova⁷, I. D. Zlobin⁸

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 Egorova Iuliia, Quality Director, Samarskie Kommunal'nye Sistemy, LLC

56 Lunacharskogo St., Samara, 443056, Russian Federation, e-mail: yegorova@samcomsys.ru

³ 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, Block 14, 81A Dubninskaia St., Moscow, 127591, Russian Federation, e-mail: okh@watertec.ru

⁴ 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

⁵ Nesterenko Ol'ga, Leading Engineer, Chief Process Engineer Department, Samarskie Kommunal'nye Sistemy, LLC;

Post Graduate Student, Water Supply and Wastewater Disposal Department, Academy of Civil Engineering and Architecture,

Samara State Technical University

56 Lunacharskogo St., Samara, 443056, Russian Federation, e-mail: oNesterenko@samcomsys.ru

⁶ Lazunin Maksim, Programmer, EcoSmart LLC

Office 118, 1 Samara River Emb., Samara, 443036, Russian Federation, e-mail: artseven@mail.ru

⁷ Strelkova Tat'iana, Group Leader, Chief Process Engineer Department, Samarskie Kommunal'nye Sistemy, LLC

56 Lunacharskogo St., Samara, 443056, Russian Federation, e-mail: tStrelkova@samcomsys.ru

⁸ Zlobin Ivan, Leading Process Engineer, Municipal Wastewater Treatment Facilities, Samarskie Kommunal'nye Sistemy, LLC

56 Lunacharskogo St., Samara, 443056, Russian Federation, e-mail: iZlobin@samcomsys.ru

For citation: Stepanov S. V., Egorova Iu. A., Khar'kina O. V., Avdeenkov P. P., Nesterenko O. I., Lazunin M. V., Strelkova T. A., Zlobin I. D. Results of the mathematical simulation of wastewater treatment processes in aeration tanks at the Samara Municipal Wastewater Treatment Facilities during the upgrade and commissioning. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaya Tekhnika*, 2024, no. 11, pp. 24–31. DOI: 10.35776/VST.2024.11.03. (In Russian).

The results of mathematical simulation of the operation of the existing biological wastewater treatment facilities using POTENTIAL software that was used for 10 months to optimize the operation of aeration tanks during the upgrade and commissioning are presented. The data on the quantitative and qualitative composition of wastewater supplied to the aeration tanks adopted in the project are compared with the actual data for the period 2023–2024. Calculation of the actual values of the growth and aerobic age of the activated sludge using the formulas included in the POTENTIAL software showed that the sustained required quality of the effluent in relation to ammonium and nitrites was observed with an aerobic age of activated sludge of 24.1–27 days and a wastewater temperature of 19.1–24.8 °C, provided the concentration of $N-NH_4$ was less than 1 mg/l, and $N-NO_2$ was less than 0.1 mg/l. As a result of calibration and verification of the mathematical model embedded in POTENTIAL software, the values of kinetic constants and coefficients were

selected for a separate process line «aeration tank No. 7 – secondary settling tank No. 5» resulting in predicting the operation of the aeration tanks with a high degree of accuracy (deviations between the calculated and actual data were less than 8%).

Key words: wastewater, biological removal of nitrogen and phosphorus from wastewater, kinetic constants, calculation of aeration tanks, VODGEO/SamSTU method, ASM2d model, formulas of enzymatic kinetics, mathematical simulation.

The study was carried out using software designed within the framework of Agreement No. 4951GSI/85526 between the FSBI «Fund for Assistance to Small Innovative Enterprises in Science and Technology» and EcoSmart LLC.

Введение

В статье [1] была представлена математическая модель процессов очистки сточных вод в аэротенках с биологическим удалением азота и биологическим удалением фосфора, разработанная нами на основе существующих методик ВОДГЕО/СамГТУ и ASM2d, а также основанное на ней программное обеспечение «ПОТЕНЦИАЛ – ПОмощник ТЕхНолога – ЦИфровая АЛьтернатива». Новизна разработанной математической модели заключается, в том числе, в решении «обратной задачи», когда требуется определить концентрации загрязнений в очищенных сточных водах при имеющихся конструктивных характеристиках аэротенков и вторичных отстойников, установлении значений технологических параметров эксплуатации блока биологической очистки для конкретного качества и количества поступающих исходных сточных вод, а также выдачи количественных рекомендаций по оптимизации технологического режима работы очистных сооружений.

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. Отметим, что идея создания ПО, выдающего технологические решения и рекомендации для управления процессами биологической очистки, высказывалась давно, например в работах [2; 3]. Поскольку разработанная нами математическая модель является новой, она, безусловно, нуждается в обосновании, как с точки зрения теории (описана в [1]), так и практики, что представлено в настоящей работе.

Цель работы – реализация разработанной математической модели процессов очистки сточных вод в аэротенках на реальном объекте с калибровкой, верификацией и сравнением фактических данных работы сооружений с расчетными результатами.

Городские очистные канализационные сооружения г. Самары

Тестирование математической модели и разработанного на ее основе ПО осуществлялось на Городских очистных канализационных сооружениях (ГОКС) г. Самары. Проект реконструк-

ции ГОКС разрабатывался в несколько очередей, начиная с 2014 г. [4; 5]. В конце 2023 г. на этих сооружениях были полностью завершены масштабные строительно-монтажные работы, включающие реконструкцию аэротенков по схеме Кейптаунского университета (УСТ). Авторы проекта при разработке блока биологической очистки применили имитационное моделирование в программе GPS-X, которая основана на модели ASM2d [6].

Согласно полученному в 2023 г. комплексному экологическому разрешению (КЭР), концентрации загрязнений в очищенных сточных водах должны соответствовать следующим показателям, мг/л: БПК₅ – 8, взвешенные вещества – 10, N–NH₄ – 1, N–NO₃ – 9, N–NO₂ – 0,1, P–PO₄ – 0,7.

Проектный расход сточных вод 97-го процентилля (3% обеспеченности) был определен в проекте 2020 г. за период с 1 октября 2016 г. по 30 сентября 2019 г. и составил 640 тыс. м³/сут, в том числе 384 тыс. м³/сут для первой очереди и 256 тыс. м³/сут для второй, а среднесуточный – 418 тыс. м³/сут для всего комплекса очистных сооружений, в том числе для первой очереди 250 800 м³/сут, для второй – 167 200 м³/сут.

ПО «ПОТЕНЦИАЛ», в соответствии с лицензионным договором, было установлено на компьютер, работающий в локальной сети ГОКС. Данные ПО в тестовом режиме использовались в период с сентября 2023 г. по июль 2024 г. при пусконаладочных работах реконструированных аэротенков. Это было полезно для моделирования работы аэротенков при неизбежном повышенном расходе сточных вод, приходящимся на один аэротенк, и, как следствие, повышенных нагрузках на активный ил из-за вывода части сооружений на реконструкцию. На данном этапе исходные данные для расчетов вносились вручную в интерфейс программы. В дальнейшем планируется автоматический ввод данных с помощью существующей SCADA-системы от имеющихся на ГОКС приборов (счетчиков расхода сточных вод по аэротенкам и избыточного ила, оксиметров аэробных и аноксидных зон, системы автоматического контроля качества очищенных сточных вод) и используемых

Таблица 1

Показатель	Осветленная сточная вода					
	по проекту 2014 г.		по факту 2023–2024 гг.			
	среднее	максимум	минимум	среднее	максимум	расчетное
Взвешенные вещества, мг/л	64	100	40	93	204	124,5
БПК ₅ , мг/л	76	114	67	112	188	132
ХПК, мг/л	—	—	150	241	374	282
N–NH ₄ , мг/л	23,3	28,6	10,9	26	36	31
Температура воды, °С	21,4*		14,8	21,2	27	15,6/26,6**
P–PO ₄ , мг/л	2,6	3,2	2,26	3,04	4,02	3,55
Фосфор общий, мг/л	4,2	5,1	—	4,86	—	5,7
Азот общий, мг/л	—	—	—	31,2	—	37,4
Примечания: * средняя температура за 2010–2013 годы; ** расчетные значения температуры (минимальная/максимальная).						

на предприятии электронных отчетов в формате Microsoft Office Excel (концентрации загрязнений исходной воды, параметры активного ила, расход реагента и т. д.).

В табл. 1 представлен проектный и фактический состав осветленных сточных вод, поступающих в аэротенки. Фактические расчетные концентрации загрязнений определены в соответствии с требованиями СП 32.13330.2018 «Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85 (с Изменениями № 1, 2, 3)» на основании массива данных за период с января 2023 г. по сентябрь 2024 г. с расчетом нагрузок и расхода сточных вод 85-го перцентиля.

Анализ табл. 1 показывает, что расчетные концентрации загрязнений сточных вод в период 2023–2024 годов были выше проектных в 1,08–1,25 раза. Фактическое соотношение

БПК₅:N_{общ}:P_{общ} составило по средним и расчетным показателям примерно одинаковую величину – 100:28:4,3, что является достаточным для эффективной реализации процессов биологической очистки сточных вод. В процессе очистки необходимо удалить, считая по фактическим расчетным концентрациям, 27,3 мг/л азота и 5 мг/л фосфора при БПК₅ осветленной воды 132 мг/л. Аналогичные данные, определенные по средним концентрациям, составляют 20,1 мг/л азота и 4,16 мг/л фосфора при БПК₅ 112 мг/л. Таким образом, имеющихся в сточных водах органических веществ достаточно для процесса денитрификации, но недостаточно для достижения требуемого качества очищенной воды по фосфору только биологическим методом, что требует дозирования реагента для химического доудаления фосфора.

Фактические значения расхода и температуры сточных вод с января 2023 г. по сентябрь 2024 г.

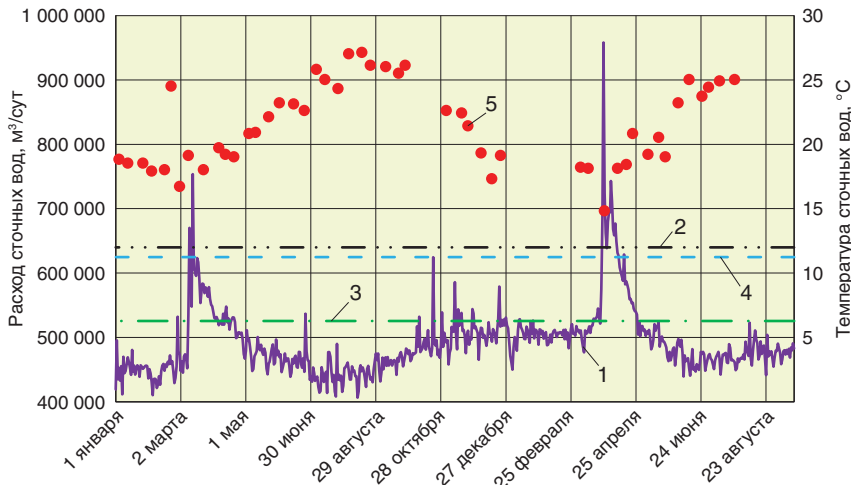


Рис. 1. Параметры сточных вод за 2023 и 2024 годы
1 – расход; 2 – проектный расход (97-й перцентиль); 3 – фактический расход (85-й перцентиль); 4 – фактический расход (97-й перцентиль); 5 – температура

представлены на рис. 1. Анализ приведенных данных показывает, что наибольшие расходы сточных вод, поступающих на весь комплекс ГОКС, наблюдались в марте – 753 747 и 958 089 м³/сут в 2023 и 2024 годах соответственно. При этом период, когда приток сточных вод превышал максимальный расчетный проектный расход 640 тыс. м³/сут, приходился на март – начало апреля. Температура сточных вод в это время 15–18 °С была ниже, чем в наиболее холодные зимние месяцы, что связано с обильным снеготаянием и одновременными дождями в весенний период. За наблюдаемый период расход

изменялся от 406 298 до 958 089 м³/сут со средним значением 491 863 м³/сут, расход 85-го перцентиля составил 525 328 м³/сут, расход 97-го перцентиля — 624 962 м³/сут. Отметим заметное увеличение среднесуточного расхода в 1,18 раза и небольшое снижение максимального расчетного расхода 97-го перцентиля (на 2,3%).

Калибровка и верификация математической модели

Первоначально калибровка ПО «ПОТЕНЦИАЛ» осуществлялась на массиве данных, предоставленных ООО «Самарские коммунальные системы» за июль — сентябрь 2023 г. Задача калибровки состояла в том, чтобы определить значения кинетических констант и коэффициентов, заложенных в используемые нами расчетные уравнения ферментативной кинетики, обеспечивающих наилучшее совпадение расчетного и фактического качества очищенных сточных вод. В процессе калибровки было установлено, что технологические параметры работы аэротенков (в рассматриваемый период в работе находилось шесть-восемь аэротенков из двенадцати) изменялись в широких пределах. Например, доза ила в одном аэротенке составляла 2 г/л, а в другом в тот же день — 4,2 г/л. Поэтому калибровка выполнялась на отдельной технологической линии очистных сооружений «аэротенк № 7 — вторичный отстойник № 5» производительностью 46,8–61 тыс. м³/сут, прошедшей реконструкцию и имеющей отдельную иловую систему. При этом был использован массив данных за ноябрь 2023 г. — август 2024 г.

Результаты математического моделирования работы аэротенков после реконструкции

Проверкой корректности любых моделей и методик является расчет уже существующих объектов и сравнение данных расчета с фактическими данными эксплуатации [7]. Для отработки модели расчета аэротенков на реальных сооружениях необходим большой массив достоверных данных о поступающих и очищенных сточных водах и технологических параметрах эксплуатации сооружений (концентрации растворенного кислорода, дозы активного ила, расходы избыточного активного ила и т. д.), что позволит сравнить расчетные концентрации загрязнений в очищенной воде с фактическими.

Математическая модель, лежащая в основе ПО «ПОТЕНЦИАЛ» [1], основана на формулах ферментативной кинетики, выведенных нами для решения эксплуатационной задачи, т. е. для определения качества очищенной воды при

известных конструктивных и технологических параметрах уже существующих аэротенков. Расчетными параметрами являются концентрации органических загрязнений в очищенной воде, оцениваемые по ХПК и БПК₅, взвешенным веществам, соединениям азота и фосфора. Полученные результаты сравниваются с нормативными требованиями, и далее программа выдает количественные рекомендации по изменению/оптимизации режима эксплуатации аэротенков так, чтобы обеспечить требуемое качество очищенных сточных вод, если в существующих аэротенках это возможно (при корректно заложенных в проект и реализованных при строительстве схеме, объемах, расходах рециклов, достаточности производительности аэрационной системы и т. д.).

Общий фактический прирост активного ила по сухому веществу, кг/сут, в ПО «ПОТЕНЦИАЛ» рассчитывается по формуле:

$$\Pi_i = Q_{\text{и}} a_{\text{и}} + a_i Q_{\text{сут}} \cdot 10^{-3} + \Delta a_i W_{\text{аэп}} \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{и}}$ — расход избыточного активного ила, м³/сут; $a_{\text{и}}$ — концентрация избыточного и возвратного активного ила, г/л; a_i — концентрация взвешенных веществ в очищенной воде, мг/л; $Q_{\text{сут}}$ — суточный расход сточных вод, м³/сут; Δa_i — изменение дозы активного ила в аэробной зоне за сутки, г/(л·сут); $W_{\text{аэп}}$ — объем аэробной зоны, м³.

Фактический аэробный возраст активного ила, сут, в ПО «ПОТЕНЦИАЛ» определяется по выражению:

$$\theta_{\text{аэп}} = \frac{W_{\text{аэп}} a_i}{\Pi_i}, \quad (2)$$

где a_i — доза активного ила в аэробной зоне, г/л (кг/м³).

Результаты расчетов общего фактического прироста и аэробного возраста активного ила, выполненные по среднемесячным значениям за три месяца 2024 г. для первой и второй очередей ГОКС г. Самары, представлены в табл. 2. Данные за июнь не приведены из-за вывода части сооружений на техническое обслуживание.

Из табл. 2 видно, что сооружения первой и второй очередей в анализируемый период работали при сильно отличающихся технологических режимах. Расходы сточных вод на один аэротенк первой очереди превышали соответствующий показатель второй очереди в 1,7–3 раза, а дозы ила в аэротенках второй очереди были больше, чем в аэротенках первой очереди в 1,2–1,9 раза, что привело к чрезвычайно значительному отличию в аэробном возрасте активного ила по оче-

Таблица 2

Месяц	Расход сточных вод, м³/сут	Объем аэробных зон, м³	Продолжительность пребывания в аэробной зоне, ч	Доза ила в аэротенке, г/л	Изменение дозы ила в аэротенке, г/(л·сут)	Концентрация взвешенных веществ в очищенной воде, мг/л	Расход избыточного ила, м³/сут	Концентрация избыточного ила, г/л	Прирост активного ила, кг/сут	Температура, °С	Аэробный возраст ила, сут
Первая очередь											
Апрель	348 749	57 195	3,9	3,4	–0,008	6,9	2066	11,7	26 119	19,1	7,5
Май	318 362	57 195	4,3	4,1	0,022	8,1	2140	12	29 636	19,6	7,9
Июль	329 902	45 756	3,3	5,1	–0,008	6,9	2383	11,2	28 591	24,8	8,1
Вторая очередь											
Апрель	243 766	65 837	6,5	6,5	0,038	6,9	1042	13,8	18 568	19,1	22,9
Май	178 324	65 837	8,9	7,5	0,033	8,1	1271	13,2	20 368	19,6	24,2
Июль	136 282	54 868	9,7	6,3	–0,038	6,9	1142	11,7	12 246	24,8	28,3

редям — в 3,2–3,6 раза. Это связано с тем, что в период реконструкции и пусконаладочных работ не все сооружения были введены в эксплуатацию и не было технической возможности равномерно распределить расход сточных вод по очередям, что планируется сделать в дальнейшем. Однако именно такая разница в реальных условиях эксплуатации позволила проверить работу ПО «ПОТЕНЦИАЛ» в различных условиях эксплуатации на одной и той же сточной воде.

Следует обратить внимание, что стабильное нормативное качество очищенных сточных вод по аммонии и нитритам наблюдалось только на второй очереди при аэробном возрасте активного ила 22,9–28,3 сут и температуре сточных вод 19,1–24,8 °С, когда концентрации азота аммонийного составили 0,04–1 мг/л, а азота нитритов — 0,03–0,1 мг/л. Согласно уравнению Михаэлиса–Ментен, для одной и той же сточной воды более низкие концентрации загрязнений в очищенной воде обуславливают более низкие удельные скорости биохимических процессов. В соответствии с этим на ГОКС наблюдаемые удельные скорости окисления аммонийного азота по беззольному веществу на второй очереди составили 0,4–1,65 мг/(г·ч), а на первой существенно выше — 1,45–3,29 мг/(г·ч), что привело к менее глубокой нитрификации.

В ПО «ПОТЕНЦИАЛ» расчет процессов нитрификации осуществляется как по удельной скорости окисления аммония, так и по минимальным значениям аэробного возраста активного ила первой и второй стадий нитрификации, обеспечивающих требуемое качество очищенной воды по аммонии и нитритам. Это позволяет избежать проблем, которые могут возникнуть при расчете аэробных зон аэротенков или толь-

ко через значение аэробного возраста активного ила, или только через скорости нитрификации. Выполненный расчет показал, что для сооружений первой очереди в условиях пусконаладочных работ оказался недостаточным аэробный возраст ила. Для сооружений второй очереди концентрация аммония определялась скоростью его окисления. Эти данные еще раз доказывают необходимость расчета удельных скоростей окисления.

Как отмечалось выше, тестирование ПО «ПОТЕНЦИАЛ» осуществлялось при проведении пусконаладочных работ на отдельной технологической линии «аэротенк № 7 — вторичный отстойник № 5». В табл. 3 в качестве примера приведены концентрации загрязнений в очищенной воде, полученные в результате моделирования работы блока с применением ПО «ПОТЕНЦИАЛ» за три даты, в сравнении с фактическими показателями. Отметим, что 14 и 15 ноября в потоки иловой смеси после аэротенков вводили раствор сульфата алюминия дозой 18,5 мг/л по Al_2O_3 . Соответствующее значение β -фактора, при котором адекватно описывалось реагентное удаление фосфора, оказалось равным 3.

Таблица 3

Показатель, мг/л	13.11.2023		14.11.2023		15.11.2023	
	расчет	факт	расчет	факт	расчет	факт
Азот аммонийный	0,68	0,73	0,62	0,61	0,63	0,64
Азот нитритов	0,02	< 0,02	0,02	< 0,02	0,02	0,02
Азот нитратов	8,7	8,9	9,1	9,8	6,61	6,6
Фосфор фосфатов	1,63	1,59	0,28	0,29	0,53	0,55
БПК ₅	3,79	4	7,52	8	5,93	5,5

Главное окно

Вода, поступающая в аэротенк

50904.0Qсут - расход сточных вод суточный, м3/сут

21.3T - температура, °C

123.0Lвх - БПК5, мг/л

225.0ХПКвх - ХПК, мг/л

126.0Свх - взвешенные вещества, мг/л

5.5Щвх - щелочность, ммоль/л НСО3

2.6РРО4вх - фосфор фосфатов, мг/л

29.6Аммоний-ион, мг/л

0.04Нитрит-ион, мг/л

Технологические параметры

3.5СО - КРК в аэробных зонах (усредненная по аэротенкам в значимой точке), О2, мг/л

0.2СОанокс - КРК в аноксидных зонах (усредненная по аэротенкам в значимой точке), С

2.8ai - концентрация активного ила в аэротенках, г/л

2040.0Qанаэр - расход анаэробного рецикла общий на все аэротенки, м3/ч

3.8аИ - концентрация избыточного и возвратного АИ, г/л

2600.0Синтр - расход нитратного рецикла общий на все аэротенки, м3/ч

2200.0QВ - расход возвратного АИ общий на все аэротенки, м3/ч

290.0СИ - расход избыточного АИ, м3/сут

0.35s - зольность, доли единицы

Конструктивные параметры сооружения

2798.0Ванаэр - объем анаэробной зоны, м3

8373.0Ванокс - объем аноксидной зоны, м3

10969.0Вазэр - объем аэробной зоны, м3

3.0β - фактор для реактивного удаления фосфора

2290.0Ftot - суммарная площадь поверхности вторичных отстойников, м2

4.29Hсет - глубина зоны отстаивания во вторичном отстойнике, м

0.4Kss - коэффициент использования объема вторичного отстойника

Кинетические константы

1.18TKM/N-NH4

1.6Робш/Р-Р04

0.04КНАс/БПК - доля ацетата в ХПК

2.0КХПК/БПК5

1500.0kНАс - константа потребления ацетата в анаэробной зоне, г ХПК/(м3·сут)

3.0K5НАс - константа насыщения по ацетату, мг/л

0.03кНАс - температурная константа потребления ацетата, 1/°C

0.05пНАс,Р - стехиометрический коэффициент удаления фосфора, мг Р/мг ХПК ацетата

0.6γ - коэффициент прироста биомассы, кгБВАИ/кгДБПК

Выходные параметры

Расчетные

Описание

1.32Танаэр - продолжительность пребывания в анаэробной зоне, ч

3.95Танокс - продолжительность пребывания в аноксидной зоне, ч

5.17Таэр - продолжительность пребывания в аэробной зоне, ч

10.44Тобш - суммарная продолжительность пребывания в аэротенке, ч

2.26Робш - кратность циркуляции общая, доли единицы

1.23Ринтр.факт - фактическая кратность нитратного рецикла, доли единицы

1.05Ринтр.требуемое - требуемая кратность нитратного рецикла, доли единицы

0.96Ранаэр - кратность анаэробного рецикла, доли единицы

1.04Рi - Кратность рецикла ВАИ, доли единицы

23.52Вазр - аэробный возраст АИ, сут

7.75ВА1 - расчетное значение аэробного возраста АИ для достижения требуемой концентрации N-NH4, сут

12.69ВА2 - Расчетное значение аэробного возраста АИ для достижения требуемой концентрации N-NO2, сут

3.01ЩН - щелочность после нитрификации, мг-экв/л

0.63Намв.вх - концентрация азота аммонийного в очищенной воде по возрасту, мг/л

6.62x1 - азот нитратов в очищенной воде (по скорости), мг/л

5.76x3 - азот нитратов в очищенной воде, мг/л (по рециклу)

0.08x4 - азот нитратов в очищенной воде, мг/л (по наличию органики)

Качество очищенной воды

Расчетное

Требуемое

Фактическое

Описание

0.6310.64Намв.вх - азот аммонийный, мг/л

0.020.10.02NNO2вх - азот нитритов, мг/л

6.6196.6NNO3вх - азот нитратов, мг/л

5.9385.5Lвх - БПК5, мг/л

4.0104ат - взвешенные вещества, мг/л

0.530.70.55РРО4вх - фосфор фосфатов, мг/л

Рассчитать

Сохранить

Динамический режим

График

Получить рекомендацию

Показать журнал

Рис. 2. Результаты математического моделирования в ПО «ПОТЕНЦИАЛ» (15 ноября 2023 г.)

Из данных, представленных в табл. 3 видно, что при подобранных значениях кинетических констант и коэффициентов относительная погрешность результатов расчета и фактических анализов составляет менее 8%.

Интерфейс ПО «ПОТЕНЦИАЛ» с результатами моделирования за 15 ноября 2023 г. представлен на рис. 2.

Анализ рис. 2 показывает, что технологическая линия «аэротенк № 7 – вторичный отстойник № 5» работала при общей продолжительности пребывания в аэротенке 10,4 ч, дозе ила 2,8 г/л, достаточной кратности рециклов, аэробном возрасте активного ила 23,5 сут, что обеспечивало требуемое качество очищенных сточных вод по всем показателям.

Значения кинетических констант и коэффициентов процессов окисления органических веществ, нитрификации и денитрификации, подобранные в результате калибровки и верификации ПО на основании данных работы отдельной технологической линии «аэротенк № 7 – вторичный отстойник № 5» за период с ноября 2023 г. по август 2024 г., представлены в табл. 4.

Значения констант, описывающих биохимические процессы в анаэробной зоне, определенные в тех же условиях, оказались следующими: константа потребления ацетата – 1500 г/(м³·сут) по ХПК, константа насыщения по ацетату – 3 мг/л, температурная константа потребления ацетата – 0,03 °C⁻¹.

Таблица 4

Кинетические константы и коэффициенты	Окисление органических веществ	Денитрификация	Нитрификация	
			первая стадия	вторая стадия
Максимальная скорость окисления, мг/(г·ч)	15	—	6,2–8,5	—
Константа Михаэлиса, мг/л	10	—	0,5	—
Коэффициент ингибирования продуктами метаболизма активного ила, л/г	0,07	—	0,09	—
Температурная константа, °C ⁻¹	0,09	0,06	0,08	0,07
Максимальная скорость роста для 20 °C, сут ⁻¹	—	1,9–3	0,5	1
Константа полунасыщения, мг/л	—	30 (по БПК ₅) 0,5 (по N–NO ₃)	0,9 (по N–NH ₄)	0,22–0,7* (по N–NO ₂)
Константа полунасыщения по кислороду, мг/л	0,625	0,17	1,1	0,8
Константа полунасыщения по щелочности, ммоль/л	—	—	0,5	—
Скорость распада микроорганизмов для 20 °C, сут ⁻¹	—	0,05	0,08	0,03

* Меньшее значение принимается при очистке до 0,02 мгN/л, большее – при очистке до 0,1 мгN/л и выше.

Сравнение полученных значений кинетических констант и коэффициентов, например с данными [8], еще раз показывает необходимость уточнения значений всех кинетических констант и коэффициентов, пусть даже определенных для сточных вод такого же типа, в процессе верификации модели на конкретных очистных сооружениях.

Выводы

1. Программное обеспечение «ПОТЕНЦИАЛ» использовалось в течение 10 месяцев, в период реконструкции и пусконаладочных работ на Городских канализационных сооружениях г. Самары для моделирования работы сооружений биологической очистки.
2. Результаты математического моделирования на отдельной технологической линии «аэротенк № 7 – вторичный отстойник № 5» показыва-

ли, что в условиях ГОКС г. Самары стабильное качество очищенных сточных вод по $N-NH_4$ менее 1 мг/л и $N-NO_2$ менее 0,1 мг/л достигалось при фактическом аэробном возрасте активного ила 22,9–28,3 сут и температуре иловой смеси в аэротенке 19,1–24,8 °С. Наблюдаемые удельные скорости нитрификации, соответствующие нормативной глубине очистки, составили 0,4–1,65 мгN/(г·ч).

3. В результате калибровки и верификации были подобраны значения кинетических констант и коэффициентов для отдельной технологической линии «аэротенк № 7 – вторичный отстойник № 5». Относительная погрешность расчетов в ПО «ПОТЕНЦИАЛ» качества очищенных сточных вод, в сравнении с фактическими анализами, составила менее 8%, что подтвердило корректность разработанной авторами математической модели «ПОТЕНЦИАЛ».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Степанов С. В., Харькина 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. 22–31. DOI: 10.35776/VST.2024.09.04.
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. 22–31. DOI: 10.35776/VST.2024.09.04. (In Russian).
2. Мойжес О. В. Динамическая модель OxiD сооружений биологической очистки сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. 2008. № 10. С. 52–57.
Moizhes O. V. [Dynamic OxiD model of wastewater biological treatment facilities]. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaya Tekhnika*, 2008, no. 10, pp. 52–57. (In Russian).
3. Реготун А. А., Дайнеко О. Н., Смирнов А. В. Автоматизированное управление очистными сооружениями на базе математических моделей // Водоснабжение и санитарная техника. 2015. № 10. С. 75–79.
Regotun A. A., Daineko O. N., Smirnov A. V. [Automated control of the treatment facilities on the basis of mathematical models]. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaya Tekhnika*, 2015, no. 10, pp. 75–79. (In Russian).
4. Стрелков А. К., Егорова Ю. А., Степанов С. В., Левин Д. И., Дубман И. С., Николаев А. А. Проект реконструкции сооружений доочистки канализационных очистных сооружений г. Самары // Водоснабжение и санитарная техника. 2020. № 3. С. 33–40. DOI: 10.35776/MNP.2020.03.06.
Strelkov A. K., Egorova Yu. A., Stepanov S. V., Levin D. I., Dubman I. S., Nikolaev A. A. [Project for the reconstruction of the tertiary treatment plant at the wastewater treatment facilities of the city of Samara]. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaya Tekhnika*, 2020, no. 3, pp. 33–40. DOI: 10.35776/MNP.2020.03.06. (In Russian).
5. Егорова Ю. А., Степанов С. В., Нестеренко О. И., Стрелкова Т. А. Исследование химического удаления фосфора на Городских очистных канализационных сооружениях г. о. Самара // Водоснабжение и санитарная техника. 2021. № 9. С. 32–37. DOI: 10.35776/VST.2021.09.05.
Egorova Yu. A., Stepanov S. V., Nesterenko O. I., Strelkova T. A. [Study of the chemical removal of phosphorus at the municipal wastewater treatment facilities of the Samara Urban District]. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaya Tekhnika*, 2021, no. 9, pp. 32–37. DOI: 10.35776/VST.2021.09.05. (In Russian).
6. Егорова Ю. А., Левин Д. И., Люшина Л. Ф., Петропавловский С. А., Баженов В. И., Данилович Д. А., Носкова И. А. Комплексная реконструкция городских очистных канализационных сооружений г. Самары // Водоснабжение и санитарная техника. 2016. № 8. С. 80–88.
Egorova Yu. A., Levin D. I., Liushina L. F., Petropavlovskii S. A., Bazhenov V. I., Danilovich D. A., Noskova I. A. [Integrated upgrade of the Samara Municipal Wastewater Treatment Facilities]. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaya Tekhnika*, 2016, no. 8, pp. 80–88. (In Russian).
7. Кевбрина М. В., Дорофеев А. Г., Агарев А. М. Сравнение результатов расчета аэротенков по разным методикам (в порядке обсуждения) // Водоснабжение и санитарная техника. 2022. № 9. С. 25–34. DOI: 10.35776/VST.2022.09.04.
Kevbrina M. V., Dorofeev A. G., Agarev A. M. [Comparison of the results of calculating aeration tanks according to different methods (for discussion)]. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaya Tekhnika*, 2022, no. 9, pp. 25–34. DOI: 10.35776/VST.2022.09.04. (In Russian).
8. Харькина О. В. Эффективная эксплуатация и расчет сооружений биологической очистки сточных вод. – Волгоград: Панорама, 2015. 433 с.
Khar'kina O. V. *Effektivnaya ekspluatatsiya i raschet sooruzhenii biologicheskoi ochistki stochnykh vod* [Efficient operation and calculation of the wastewater biological treatment facilities. Volgograd, Panorama Publ., 2015, 433 p.].