Инновационное развитие технологий удаления биогенных элементов из сточных вод на основе прогнозного моделирования

Жильникова Наталья Александровна
д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры управления качеством и интегрированных систем менеджмента, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, n.zhilnikova@guap.ru

Проблема исследования обусловлена недостаточной эффективностью традиционных аэротенков при глубоком удалении соединений азота и фосфора из городских сточных вод, что затрудняет соблюдение нормативов допустимого сброса и увеличивает эксплуатационные затраты организаций водопроводно-канализационного хозяйства. В работе предложена модель комплексной модернизации сооружений биологической очистки, обеспечивающей повышение эколого-экономической эффективности очистки сточных вод. Гипотеза исследования заключается в том, что интеграция плоскостной загрузки в анаэробной и аноксидной зонах, локальной реагентной доочистки и цифрового прогнозирования позволит стабилизировать процессы удаления биогенных элементов и сократить ресурсные затраты. Использованы методы ретроспективного анализа производственных данных, рекуррентные нейронные сети с долгой краткосрочной памятью и обобщенные аддитивные модели положения, масштаба и формы. Разработанная структура модели объединяет анаэробную, аноксидную и аэробную стадии, блоки регулирования аэрации и обработку иловых вод, а также модуль оценки риска превышения нормативов. Предложенный подход создает предпосылки для сокращения расхода воздуха, реагентов и объемов избыточного осадка.
Ключевые слова: биологическая очистка, биогенные элементы, прогнозное моделирование, рекуррентные нейронные сети, цифровое управление.

Введение

Соблюдение действующих российских нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения и нормативов допустимого сброса (НДС) требует от организаций водопроводно-канализационного хозяйства (ОВКХ) внедрения технологических решений, обеспечивающих не только достижение требуемых показателей очистки, но и приемлемую эколого-экономическую эффективность эксплуатации. Актуальность данной задачи возрастает в условиях увеличения эксплуатационных затрат на реагенты, электроэнергию и обработку образующихся осадков.

Значительная часть действующих сооружений очистки городских сточных вод функционирует на основе традиционных схем биологической очистки, эффективность которых в отношении глубокого удаления соединений азота и фосфора остается недостаточной [1]; по данным ранее выполненных исследований, удаление фосфатов в таких системах может составлять лишь 20–30% [2]. В связи с этим требуется совершенствование процессов нитрификации, денитрификации и биологического удаления фосфора, а также применение технологических решений, снижающих риск превышения нормативных показателей по биогенным элементам в очищенных сточных водах [3]. Недостаточное качество очистки приводит к усилению антропогенной нагрузки на водные объекты и увеличению платежей за негативное воздействие на окружающую среду. Поэтому модернизация действующих очистных сооружений должна быть ориентирована не только на достижение нормативных показателей, но и на снижение энерго- и материалоёмкости процесса очистки [4 - 6].

В работе предложена модель комплексной модернизации аэротенков, обеспечивающей снижение капитальных и эксплуатационных затрат ОВКХ при устойчивом соблюдении нормативов сброса соединений азота и фосфора, установленных для водных объектов рыбохозяйственного значения.

Гипотеза исследования заключается в том, что интеграция алгоритмов машинного обучения, в частности, рекуррентных нейронных сетей долгой краткосрочной памяти (LSTM - Long Short-Term Memory) для прогнозирования качества поступающих сточных вод позволит оптимизировать процесс кислотного сбраживания на плоскостной загрузке и минимизировать требуемый коэффициент запаса химических реагентов, применяемых для осаждения фосфатов химическим способом [7].

Материалы и методы исследований

В исследовании использован ретроспективный анализ работы очистных сооружений Санкт-Петербурга и Ленинградской области, где была внедрена технология интенсификации кислотного сбраживания за счет размещения плоскостной загрузки в анаэробной и аноксидной зонах аэротенка [2, 8]. Методической основой послужили подходы, изложенные в информационно-техническом справочнике ИТС 10–2019 «Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов», а также требования ГОСТ Р 54097–2010 «Ресурсосбережение. Наилучшие доступные технологии. Методология идентификации».

При практическом моделировании процессов управления технологическим режимом действующих очистных сооружений использовались два класса математических моделей - рекуррентные нейронные сети с долгой краткосрочной памятью и обобщенные аддитивные модели положения, масштаба и формы (GAMLSS - Generalized Additive Models for Location, Scale and Shape) [9]. Рассматриваемая архитектура нейронных сетей LSTM основана на использовании специальной системы вентилей, которые регулируют поток информации через ячейку памяти на каждом временном шаге t. Текущее состояние сети задается приведенными ниже математическими соотношениями:

вентиль забывания:

$$f_t = \sigma\left(W_f x_t + U_f h_{t-1} + b_f\right); \qquad (1)$$

входной вентиль:

$$i_t = \sigma\left(W_i x_t + U_i h_{t-1} + b_i\right); \qquad (2)$$

выходной вентиль:

$$o_t = \sigma\left(W_o x_t + U_o h_{t-1} + b_o\right); \qquad (3)$$

кандидат на обновление состояния ячейки памяти:

$$\tilde{c}_t = \tanh\left(W_c x_t + U_c h_{t-1} + b_c\right); \qquad (4)$$

обновлённое состояние ячейки памяти:

$$c_t = f_t \odot c_{t-1} + i_t \odot \tilde{c}_t; \qquad (5)$$

скрытое состояние:

$$h_t = o_t \odot \tanh\left(c_t\right), \qquad (6)$$

где x_t – многомерный вектор входных данных на рассматриваемом временном шаге t, включающий основные технологические показатели поступающих сточных вод; h_{t-1} - скрытое состояние математической модели, рассчитанное на непосредственно предыдущем временном шаге; c_{t-1} – внутреннее предыдущее состояние соответствующей базовой ячейки памяти; W_f, W_i, W_o, W_c и U_f, U_i, U_o, U_c – оптимизируемые при машинном обучении весовые

матрицы; b_f, b_i, b_o, b_c - соответствующие дополнительные параметрические векторы смещений; σ - стандартная нелинейная сигмоидальная функция активации нейронов; tanh – вспомогательная математическая функция гиперболический тангенс; ⊙ - поэлементное матричное произведение двух числовых векторов. Такая структура позволяет учитывать как длительные закономерности изменения состава поступающих сточных вод, так и кратковременные возмущения технологического режима.

В отличие от классических регрессионных моделей, в которых объясняющие переменные преимущественно влияют на условное математическое ожидание отклика, модели GAMLSS позволяют одновременно описывать несколько параметров условного распределения зависимой переменной *Y*. Общий вид модели задаётся выражением:

$$g_k(\theta_k)=\eta_k=X_k\beta_k+\sum_{j=1}^{J_k} s_{jk}(x_{jk}),k=1,\ldots,p, \qquad (7)$$

где θ_k - *k*-й параметр условного распределения отклика; *p* - число моделируемых параметров распределения; $g_k(\cdot)$ - функция связи для *k*-го параметра; η_k - линейный предиктор; X_k - матрица регрессоров; β_k - вектор коэффициентов регрессии; J_k - число сглаживающих функций в уравнении для *k*-го параметра; $s_{jk}(x_{jk})$ - гладкая функция *j*-го объясняющего фактора x_{jk}.

В случае применения четырёхпараметрического семейства распределений вектор параметров может быть записан как $\theta=(\mu,\sigma,\nu,\tau)$, где μ является параметром положения, σ - параметром масштаба, а ν и τпараметрами формы. Их статистическая интерпретация определяется выбранным семейством распределения; как правило, они отражают асимметрию и тяжесть хвостов распределения.

Результаты и их обсуждение

Результаты проведенного ретроспективного анализа работы очистных сооружений в Санкт-Петербурге и Ленинградской области показали, что внедрение плоскостной загрузки в анаэробных и аноксидных зонах системы биологической очистки (БО) обеспечивает значительную интенсификацию кислотного сбраживания органических веществ, существенное повышение устойчивости снижения концентрации соединений фосфора и качественное улучшение условий для протекания процессов нитрификации и денитрификации [2].

Полученные результаты позволяют ОВКХ снижать операционные затраты, однако для обеспечения экономического эффекта и его дальнейшего увеличения необходим переход к адаптивному управлению эксплуатационными режимами очистных сооружений. При химическом осаждении фосфатов солями железа в сточных водах, содержащих значительную долю полифосфатов, требуется повышенный коэффициент запаса реагента. По данным эксплуатации сооружений Санкт-Петербурга, при дозировании перед вторичными отстойниками он составляет 2,5–3,0, тогда как при обработке иловых вод этот показатель снижается до 1,1 [10]. Это свидетельствует о перспективности переноса точки реагентной обработки в поток иловых вод при обеспечении надёжного и непрерывного контроля состава сточных вод и своевременной корректировки дозы реагента. Внедрение интеллектуального контроля режимов эксплуатации, включая прогнозное дозирование реагентов на базе LSTM-моделей, позволит реализовать этот потенциал и существенно сократить избыточный расход химических реагентов.

Применение моделей класса GAMLSS в системе автоматизированного управления оправдано необходимостью непрерывного мониторинга возраста активного ила и вероятностной оценки риска выхода качества очищенной воды за пределы нормативов. Преимущество данного класса моделей заключается в их способности моделировать не только условное математическое ожидание целевого показателя, но и динамику его масштаба и формы распределения, то есть вариабельность, асимметрию и «тяжесть хвостов», которые критичны для технологических процессов. Для реально работающих очистных сооружений это принципиально важно, так как состав и расход входящей сточной воды, температурный режим и гидравлическая нагрузка носят нестационарный характер. В таких условиях управленческие воздействия (интенсивность аэрации, расходы рециркуляционных потоков, дозировки коагулянтов или флокулянтов) должны формироваться на основе вероятностных прогнозов неблагоприятных сценариев, а не опираться исключительно на среднестатистические значения технологических параметров. [8].

Рисунок 1 иллюстрирует структуру модели комплексной модернизации аэротенка, в рамках которой согласованно функционируют четыре управляющих блока - технологический, реагентный, энергетический и цифровой. Функциональное назначение и применяемые инструменты каждого из блоков представлены в таблице 1.

Практическая ценность разработанной модели обусловлена возможностью объединить модернизацию действующего аэротенка, проводимую без возведения дополнительных резервуаров, с программно-аналитической поддержкой управления процессом БО с целью сокращения удельного расхода воздуха и реагентов, а также уменьшения прироста избыточного активного ила с одновременным соблюдением НДС по азоту и фосфору.

Заключение

Таким образом, предложенная модель модернизации аэротенков ориентирована на реконструкцию уже эксплуатируемых очистных сооружений, не требующую строительства новых ёмкостных объектов, за счёт чего организации водопроводно-канализационного хозяйства получают возможность существенно сократить капитальные вложения и операционные затраты. Внедрение в систему автоматизированного управления моделей LSTM и GAMLSS позволяет адаптировать работу комплекса к динамике состава поступающего стока, в зависимости от которого автоматически настраиваются эксплуатационные режимы сооружений, что позволит минимизировать затраты электроэнергии на подачу воздуха, оптимизировать дозирование химикатов и сдерживать прирост избыточного активного ила.

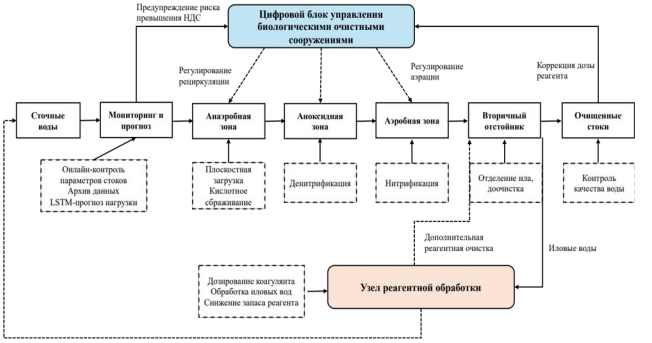


Рисунок 1. Структура модели модернизации аэротенка для снижения капитальных и эксплуатационных затрат ОВКХ при соблюдении НДС по соединениям азота и фосфора

Таблица 1
Структура и функции управляющих блоков комплексной модернизации аэротенка

Управляющий блок	Основная функция	Применяемые инструменты и методы управления
Технологический	Адаптация режимов работы анаэробной, аноксидной и аэробной зон	Внедрение плоскостной загрузки, регулирование кратности рециркуляционных потоков
Реагентный	Оптимизация расхода и точек ввода химических реагентов	Прогнозные модели LSTM, перенос точки дозирования в поток иловых вод
Энергетический	Регулирование интенсивности и расхода воздуха на аэрацию	Адаптивное управление в зависимости от прогнозируемого состава входящего стока
Цифровой	Непрерывный мониторинг технологических параметров и оценка рисков	Модели класса GAMLSS, реализация риск-ориентированного подхода

В целом, рассмотренная концепция полностью отвечает современным векторам развития отрасли водоотведения, внедрение которой при реконструкции муниципальных станций очистки особенно востребовано сегодня на фоне ужесточающихся экологических стандартов и растущего запроса на ресурсосберегающие технологии.

Литература

1. Ружицкая, О. А. Анализ современных технологий глубокой очистки сточных вод с целью внедрения на городские очистные сооружения / О. А. Ружицкая, А. В. Жолобова, В. С. Липатов // Системные технологии. 2023. № 1(46). С. 112-119. DOI 10.55287/22275398_2023_1_112.
2. Крючихин, Е.М. Эффективная очистка городских сточных вод от биогенных элементов на ЦСА Санкт-Петербурга / Е.М. Крючихин, А.Н. Николаев А.Н., Н.А. Жильникова, О.Н. Рублевская, Г.А. Панкова, Г. Н. Рафалович // Водоснабжение и санитарная техника. 2009. № 12. С. 59-62.
3. Милованова, О. В. Интегрированное проектирование объектов и систем управления в проблеме регионального устойчивого развития / О. В. Милованова, Н. С. Попов, А. А. Баламутова // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2021. № 1(79). С. 7-25. DOI 10.17277/voprosy.2021.01.pp.007-025.
4. Балымова, Е.С. Моделирование процесса биологической очистки сточных вод нефтехимического производства / Е. С. Балымова, А. Р. Новикова, Р. К. Закиров, Ф. Ю. Ахмадуллина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2025. Т. 27, № 1(123). С. 166-175. DOI 10.37313/1990-5378-2025-27-1-166-175.
5. Дудоров, В. Е. Методы очистки сточных вод, виды очистных сооружений и инновации в области очистки сточных вод / В. Е. Дудоров, Д. Н. Хисматулина, Э. Р. Исхакова // Наука среди нас. 2019. № 4(20). С. 43-48.
6. Кунденок, С. Б. Реагентная очистка различных видов сточных вод трехкомпонентной композицией / С. Б. Кунденок, Ю. А. Коваленко // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2021. № 1(46). С. 96-105. DOI 10.24866/2227-6858/2021-1-10.
7. Галузо, А. В. Разработка системы контроля и прогнозирования эффективности функционирования биологических очистных сооружений Г. Витебска на основе нейронных сетей / А. В. Галузо, В. Н. Штепа, В. Д. Ющенко // Вестник Полоцкого

государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. 2023. № 3. С. 2-10. DOI 10.52928/2070-1683-2023-35-3-2-10.
8. Жильникова Н.А. Применение технологий искусственного интеллекта для мониторинга и оптимизации процессов водоочистки / Н.А. Жильникова // Системы контроля окружающей среды. 2026. № 1(63). С. 107-116. DOI: 10.33075/2220-5861-2026-1-105-116
9. Клигман, Б. Б. Нейронные сети: применение и реализация / Б. Б. Клигман, А. М. Хахина // Информационные технологии: прошлое, настоящее, будущее : сборник статей по материалам межинститутской студенческой научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 20 мая 2021 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, 2021. С. 181-194.
10. Игнаткина, Д. О. Выбор оптимальной технологии локальной очистки сточных вод на примере предприятия табачной промышленности / Д. О. Игнаткина, А. А. Геращенко, А. П. Поздняков [и др.] // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. № 2(83). С. 84-96.

Innovative development of nutrient removal technologies from municipal wastewater based on predictive modeling

Zhilnikova N.A.
Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

JEL classification: L61, L74, R53

The research problem stems from the insufficient efficiency of conventional aeration tanks in the advanced removal of nitrogen and phosphorus compounds from municipal wastewater, which complicates compliance with allowable discharge standards and increases the operational costs of water and wastewater utilities. The paper proposes a comprehensive modernization model for biological treatment facilities, ensuring enhanced ecological and economic performance of the treatment process. The research hypothesis posits that the integration of structured carrier media in anoxic and anaerobic zones, localized chemical precipitation, and digital forecasting will stabilize nutrient removal processes and reduce resource consumption. The applied methods include a retrospective analysis of operational data, Long Short-Term Memory recurrent neural networks, and Generalized Additive Models for Location, Scale and Shape. The developed model structure integrates anaerobic, anoxic, and aerobic stages, aeration control and sludge liquor treatment units, alongside a module for assessing the risk of exceeding discharge standards. The proposed approach enables a reduction in aeration rates, chemical reagent consumption, and waste activated sludge volumes.

Keywords: biological treatment, nutrients, predictive modeling, recurrent neural networks, digital control.

References

1. Ruzhickaya, O. A. Analiz sovremennyh tekhnologij glubokoj ochistki stochnyh vod s cel'yu vnedreniya na gorodskie ochistnye sooruzheniya / O. A. Ruzhickaya, A. V. ZHolobova, V. S. Lipatov // *Sistemnye tekhnologii*, 2023, no 1(46), pp. 112-119. DOI 10.55287/22275398_2023_1_112. (In Russian).
2. Kryuchihin, E.M. Effektivnaya ochistka gorodskih stochnyh vod ot biogennyh elementov na CSA Sankt-Peterburga / E.M. Kryuchihin, A.N. Nikolaev A.N., N.A. ZHil'nikova, O.N. Rublevskaya, G.A. Pankova, G. N. Rafalovich // *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*, 2009, no 12, pp. 59-62. (In Russian).
3. Milovanova, O. V. Integrirovannoe proektirovanie ob"ektov i sistem upravleniya v probleme regional'nogo ustojchivogo razvitiya / O. V. Milovanova, N. S. Popov, A. A. Balamutova // *Voprosy sovremennoj nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo,* 2021, no 1(79), pp. 7-25. DOI 10.17277/voprosy.2021.01.pp.007-025. (In Russian).
4. Balymova, E.S. Modelirovanie processa biologicheskoj ochistki stochnyh vod neftekhimicheskogo proizvodstva / E. S. Balymova, A. R. Novikova, R. K. Zakirov, F. YU. Ahmadullina // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*, 2025, vol. 27, no 1(123), pp. 166-175. DOI 10.37313/1990-5378-2025-27-1-166-175. (In Russian).
5. Dudorov, V. E. Metody ochistki stochnyh vod, vidy ochistnyh sooruzhenij i innovacii v oblasti ochistki stochnyh vod / V. E. Dudorov, D. N. Hismatulina, E. R. Iskhakova // *Nauka sredi nas,* 2019, no 4(20), pp. 43-48. (In Russian).
6. Kundenok, S. B. Reagentnaya ochistka razlichnyh vidov stochnyh vod trekhkomponentnoj kompoziciej / S. B. Kundenok, YU. A. Kovalenko // *Vestnik Inzhenernoj shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta*, 2021, no 1(46), pp. 96-105. DOI 10.24866/2227-6858/2021-1-10. (In Russian).
7. Galuzo, A. V. Razrabotka sistemy kontrolya i prognozirovaniya effektivnosti funkcionirovaniya biologicheskih ochistnyh sooruzhenij G. Vitebska na osnove nejronnyh setej / A. V. Galuzo, V. N. SHtepa, V. D. YUshchenko // *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki*, 2023, no 3, pp. 2-10. DOI 10.52928/2070-1683-2023-35-3-2-10. (In Russian).
8. ZHil'nikova N.A. Primenenie tekhnologij iskusstvennogo intellekta dlya monitoringa i optimizacii processov vodoochistki / N.A. ZHil'nikova // *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy*, 2026, no 1(63), pp. 107-116. DOI: 10.33075/2220-5861-2026-1-105-116 (In Russian).
9. Kligman, B. B. Nejronnye seti: primenenie i realizaciya / B. B. Kligman, A. M. Hahina // *Informacionnye tekhnologii: proshloe, nastoyashchee, budushchee : sbornik statej po materialam mezhinstitutskoj studencheskoj nauchno-prakticheskoj konferencii, Sankt-Peterburg, 20 maya 2021 goda. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj lesotekhnicheskij universitet imeni S.M. Kirova*, 2021, pp. 181-194. (In Russian).
10. Ignatkina, D. O. Vybor optimal'noj tekhnologii lokal'noj ochistki stochnyh vod na primere predpriyatiya tabachnoj promyshlennosti / D. O. Ignatkina, A. A. Gerashchenko, A. P. Pozdnyakov [i dr.] // *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura*, 2021, no 2(83), pp. 84-96.