

УДК 0.48+628.16.087+631.171:636.5
DOI 10.62595/1819-5245-2025-4-57-68

СОЗДАНИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ПРОЦЕССОВ ЛОКАЛЬНЫХ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ ХЛЕБОПЕКАРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

**Т. С. СЕМЕНОВА, О. И. СЕРГИЕНКО, Н. С. БОГДАНОВ,
А. К. ПЕВКИН**

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация*

И. В. ВОЙТОВ, В. Н. ШТЕПА

Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск

Рассмотрены результаты экспериментальных исследований процессов очистки сточных вод с применением цифровых датчиков, встроенных в систему сбора и обработки информации. В процессе очистки сточных вод хлебопекарных предприятий в горизонтальном отстойнике с тонкослойным модулем получены наборы данных, статистическая обработка которых позволила выявить наличие попарных корреляционных связей между следующими показателями качества: электропроводность, pH, температура и содержание растворенного кислорода. Приведены матрицы взаимной корреляции в виде тепловых карт, построенных в среде MATLAB. Обосновано, что полученные наборы данных могут быть использованы для целей развития систем интеллектуального мониторинга и эффективного предиктивного управления качеством очистки сточных вод в практических аспектах цифрового моделирования соответствующих процессов. Создан концептуальный подход проектирования цифровых двойников процессов локальных очистных сооружений, формирующий практические предпосылки развития цифрового моделирования в условиях штатного функционирования очистных сооружений промышленных предприятий.

Ключевые слова: промышленные сточные воды, процесс очистки, показатели качества, физическая модель, Интернет вещей, мониторинг, корреляционный анализ, цифровой двойник.

Для цитирования. Создание физической модели цифрового двойника процессов локальных очистных сооружений хлебопекарных предприятий / Т. С. Семенова, О. И. Сергиенко, Н. С. Богданов [и др.] // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2025. – № 4 (103). – С. 57–68. – DOI 10.62595/1819-5245-2025-4-57-68

CREATION OF A PHYSICAL MODEL OF A DIGITAL TWIN OF THE PROCESSES OF LOCAL WASTEWATER TREATMENT FACILITIES OF BAKERY ENTERPRISES

**T. S. SEMENOVA, O. I. SERGIENKO, N. S. BOGDANOV,
A. K. PEVKIN**

ITMO University, Saint-Petersburg, Russian Federation

I. V. VOITOV, V. N. SHTEPA

Belarusian State Technological University, Minsk

The article presents the results of experimental studies of wastewater treatment processes using digital sensors integrated into a data collection and processing system. During the treatment of bakery wastewater in a horizontal settling tank with a thin-layer module, data sets were obtained. Statistical processing of these

data sets revealed pairwise correlations between the following quality indicators: electrical conductivity, pH, temperature, and dissolved oxygen content. Cross-correlation matrices are presented in the form of heat maps constructed in the MATLAB environment. It is substantiated that the obtained data sets can be used for the development of intelligent monitoring systems and effective predictive management of wastewater treatment quality in the practical aspects of digital modeling of the corresponding processes. A conceptual approach to designing digital twins of local treatment facilities has been developed, forming the practical prerequisites for the development of digital modeling under the conditions of the regular operation of industrial treatment facilities.

Keywords: industrial wastewater, treatment process, quality indicators, physical model, Internet of Things, monitoring, correlation analysis, digital twin.

For citation. Semenova T. S., Sergienko O. I., Bogdanov N. S., Pevkin A. K., Voitov I. V., Shtepa V. N. Creation of a physical model of a digital twin of the processes of local wastewater treatment facilities of bakery enterprises. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2025, no. 4 (103), pp. 57–68 (in Russian). DOI 10.62595/1819-5245-2025-4-57-68

Введение

Производственные сточные воды (СВ), особенно на крупных предприятиях первой и второй категории негативного воздействия на окружающую среду, например, в соответствии с Федеральным законом № 416-ФЗ «О водоснабжении и водоотведении» [1], перед отведением в общесплавные канализационные сети должны пройти обязательную обработку. Однако локальными очистными сооружениями (ЛОС) оснащены не все действующие производства, зачастую такое оборудование является устаревшим и требует модернизации. Существующая нормативная и правовая документация не содержит рекомендаций по проектированию и разработке очистных сооружений для малых и средних по производительности предприятий пищевой отрасли. Между тем обрабатывающая отрасль, по данным Федеральной службы государственной статистики, в 2022 г. сбросила в поверхностные водные объекты 22,5 млн м³ сточных вод, из них около трети поступает от пищевых предприятий [2]. В связи с принятием в 2025 г. нового федерального проекта «Вода России» [3] становится все более актуальной задача обеспечения показателей качества СВ, отвечающих требованиям отведения (сброса), как в централизованные системы водоотведения, так и непосредственно в геоэкосистемы.

Разработка проекта ЛОС с учетом переменного состава и расхода сточных вод представляет собой сложную задачу, поскольку в большинстве случаев параметры процессов должны изменяться в зависимости от производственной программы и технологий, а также потребляемого сырья и неравномерности водопотребления в течение суток. Как правило, на промышленных объектах водопользования применяется многоэтапная схема, последовательно сочетающая стадии предварительной очистки, включая грубую очистку, усреднение и отстаивание, и основные стадии базовых методов редукции: физико-химическую, биологическую и обеззараживания. Это приводит к значительным капитальным затратам и не всегда гарантирует достижение требуемого качества сточных вод после их утилизации.

Вместе с тем ошибки проектирования критично отражаются на этапе эксплуатации, и поэтому в последние годы технологически обоснованное применение искусственного интеллекта (ИИ) в автоматизированных системах управления ЛОС для обеспечения требуемого эффекта обработки СВ рассматривается как одна из приоритетных задач в экологически безопасном управлении водными ресурсами.

Данная тема уже достаточно долго находится в центре внимания специалистов Китая, Индии, США и ряда других стран мира, особенно применительно к внедрению технологий Интернета вещей и ИИ для контроля централизованных систем водоотведения городов, и крайне редко – на очистных сооружениях промышленных

предприятий. Среди прочих математических подходов за последние пять лет нашли свое потенциальное (возможное) применение и нейронные сети, основанные на анализе данных: Artificial Neural Networks (ANN), Long-Short Term Memory (LSTM), Fuzzy logic (FL) и Machine learning algorithms (MLAs) [4–8], метода опорных векторов (SVM) и рекуррентные нейронные сети (RNN) [9, 10]. В моделях такого типа структура ЛОС не указывается явно, а определяется путем поиска связей между имеющимися данными [10], что позволяет прогнозировать показатели качества сточных вод на различных этапах обработки.

Серьезным, часто непреодолимым, препятствием для внедрения технологий ИИ в очистке СВ является необходимость получения большого набора репрезентативных данных для построения таких математических структур, обучения ИИ и проведения предиктивного анализа [11]. С целью тестирования моделей используются реальные или модельные СВ, получаемые на опытных образцах и, реже, на действующих очистных сооружениях. Отсутствие датчиков для контроля параметров сточных вод и других элементов цифрового мониторинга может стать еще одной значительной проблемой для применения математического моделирования, в том числе с внедрением ИИ, в области экологически безопасного управления водными ресурсами.

Размытость и неполнота информации о качестве СВ значительно ограничивают ее использование в цифровых двойниках, поскольку в рамках ISO ISO 23247 «Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing»: «Digital Twin (ЦД) – цифровая модель конкретного физического элемента или процесса с подключениями к данным обеспечивает конвергенцию между физическим и виртуальным состояниями с соответствующей скоростью синхронизации».

Авторами предлагается вместо затратных исследований на опытных или опытно-промышленных образцах, или в реальных условиях проводить формирование первичной информации для последующего создания предиктивной модели на физических моделях и модельных растворах при условии соблюдения соответствия фазодисперсного состава и кинетики процессов в реальных СВ. В настоящей работе рассматривается возможность применения физической модели, оснащенной датчиками, для получения наборов данных о качестве очистки сточных вод пищевых производств в тонкослойном отстойнике на примере хлебопекарной отрасли, что может стать предметной основой для построения цифрового двойника процессов очистки промышленных сточных вод.

Цель исследований – обоснование использования физической модели процессов очистки сточных вод хлебопекарного предприятия как основы создания и штатного применения цифровых двойников локальных очистных сооружений промышленных объектов.

Для достижения цели сформулирована постановка следующих задач:

- обоснование методического и аппаратно-программного обеспечения реализации физической модели очистки сточных вод хлебопекарного предприятия;
- математическая оценка временных рядов процессов очистки сточных вод хлебопекарного предприятия, нормализация и анализ данных;
- обоснование и разработка концептуальной схемы использования физической модели при создании и штатном применении цифрового двойника процессов очистки сточных вод хлебопекарного производства.

Методика и лабораторное обеспечение физического моделирования процессов отстаивания сточных вод в тонкослойном отстойнике

Исследования процессов отстаивания сточных вод проводились в Лаборатории промышленной экологии НИУ ИТМО на экспериментальной установке горизонтального отстойника с тонкослойным модулем (рис. 1), оснащенной электронной платформой WaspMote Plug & Sense! Smart Water с набором цифровых датчиков для мониторинга и анализа процессов очистки (табл. 1) [12].



Рис. 1. Общий вид экспериментального стенда для исследования процесса отстаивания в тонкослойном отстойнике с датчиками устройства Smart Water

Таблица 1

Цифровые датчики для контроля качества сточных вод

Тип платформы	Электронная платформа для мониторинга окружающей среды WaspMote Plug & Sense! Smart Water (Liberium, Испания)			
Наименование датчика	Водородный показатель, pH	Температура, T	Электро-проводность, G	Растворенный кислород, DO
Тип датчика	Комбинированный электрод	Резистивный датчик	Двухэлектродный датчик	Гальванический элемент
Единица измерения	pH	$^{\circ}\text{C}$	$\mu\text{См}/\text{см}$	$\text{мг}/\text{дм}^3$
Пределы измерений	0–14	0–100	0–300	0–20
Относительная погрешность, %	До 0,01	До 0,01	До 0,01	± 2

Конструктивные параметры в физической модели тонкослойного отстойника подбирались путем варьирования количества, вида пластин, диаметра отверстий, высоты яруса отстаивания. Дополнительно для лучшего отстаивания в модельные растворы добавляли коагулянты «Аква-Аурат 30» и полиалюминий хлорид при вертикальном перемешивании.

Исходные концентрации модельных растворов варьировали в диапазоне $\pm 20\%$ от усредненных значений показателей качества, характерных для сточных вод хлебопекарных предприятий (табл. 2) [13]. Модельные растворы подавались в тонкослойный отстойник из расходной емкости самотеком.

Таблица 2

Состав сточных вод предприятий хлебопекарной отрасли

Показатель	Значения показателей			ПДК
	Хлебобулочный цех	Кондитерский цех	Смешанные стоки	
ХПК, мг/дм ³	900	590–2012	9,65	500
pH	7,2	6,2–9,2	7,03	6-9
БПК, мг/дм ³	600	1060	4,4	300
ВВ, мг/дм ³	1000	184	1,22	0,25
Температура, °C	30	30-50	20	22

Концентрации на выходе из отстойника непрерывно измеряли с помощью цифровых датчиков, подключенных к программному обеспечению WaspMote Plug & Sense! Smart Water.

Собранные данные передавались через микроконтроллер на персональный компьютер для первичной обработки и анализа. При этом проводилась оценка показателей качества сточных вод в реальном времени, информация обрабатывалась для оперативного принятия решений.

С целью верификации полученных данных в ходе исследований проверяли pH, температуру, электропроводность и содержание растворенного кислорода на входе и выходе из модели отстойника. Концентрации органических веществ устанавливали химическим методом по ГОСТ Р 55684-2013 (ISO 8467 : 1993); цветность контролировали по ГОСТ 31868-2012, мутность – по ГОСТ Р 57164-2016, показатели pH и электропроводности – с помощью pH-метра pH-410 и кондуктометра АНИОН-4155.

Математическая оценка временных рядов, нормализация и анализ данных процессов очистки сточных вод хлебопекарного предприятия

Экспериментально сформированный временной ряд представляет собой набор данных, включающий четыре входных и четыре выходных признака. Входные признаки соответствуют показателям температуры, растворенного кислорода, электропроводности и pH, измеренные до обработки сточных вод; выходные отражают эти же показатели после обработки СВ в тонкослойном отстойнике.

Выполненный корреляционный анализ продемонстрировал сильную корреляцию между многими параметрами сточных вод на входе и выходе из отстойника. Это иллюстрируется матрицей двумерной корреляции в виде heatmap, построенной на основе разработанной в прикладном пакете MATLAB программы. В качестве исходных были использованы попарно соотнесенные данные между входом и выходом, затем они были нормализованы от 0 до 1 по методу MinMax и аппроксимированы полиномом пятой степени. На основе нормализованных данных представлены графики, показанные на рис. 2, а и б.

Общий объем данных составил 36 000 измерений, что позволяет выявлять корреляции между входными и выходными показателями и проводить глубокий анализ временных зависимостей. Такой объем информации создает благоприятные условия для обучения и тестирования моделей машинного обучения, способных предсказывать параметры после водообработки.

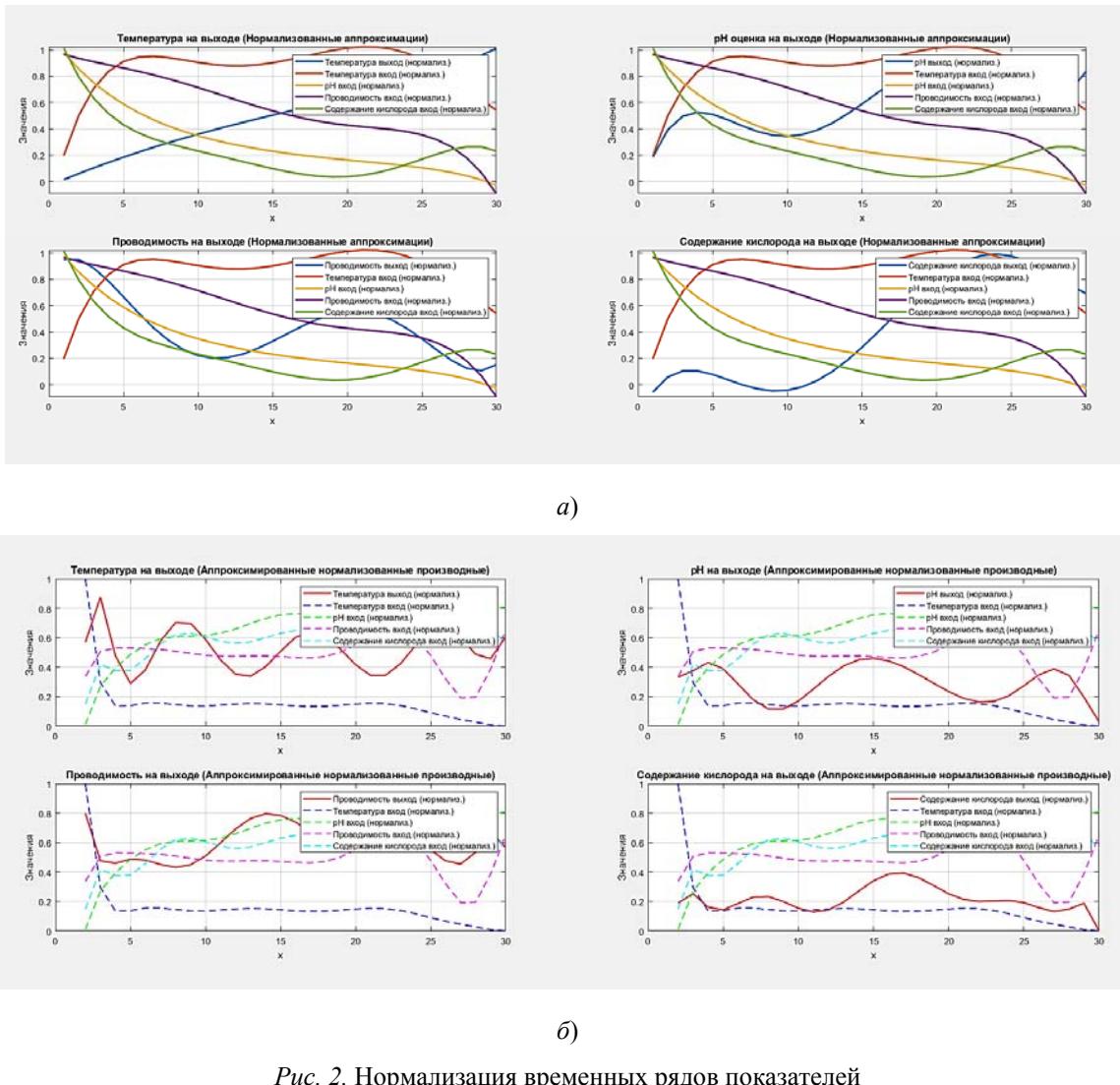


Рис. 2. Нормализация временных рядов показателей качества очистки по методу MinMax:

а – нормализация временных рядов показателей качества сточных вод с аппроксимацией полиномов пятой степени; б – нормализация временных рядов по скорости изменения показателей качества сточных вод с аппроксимацией полиномов пятой степени

На рис. 3–5 приводятся результаты анализа взаимной корреляции показателей качества СВ на входе и выходе из отстойника при отстаивании модельных растворов, характерных для сточных вод предприятий хлебопекарной отрасли: кондитерского, хлебопекарного и смешанного производства.

Матрицы (рис. 3–5) включают в себя корреляции входных данных, выходных данных, а также две симметричные матрицы, отражающие зависимости выходных данных от входных.

На рис. 3 показатель электропроводности на выходе из отстойника демонстрирует сильную корреляцию с показателями pH (0,8492) и электропроводности (0,8622) в исходной сточной воде, и среднюю корреляцию – с показателем растворенного кислорода (0,4338) в исходной СВ.

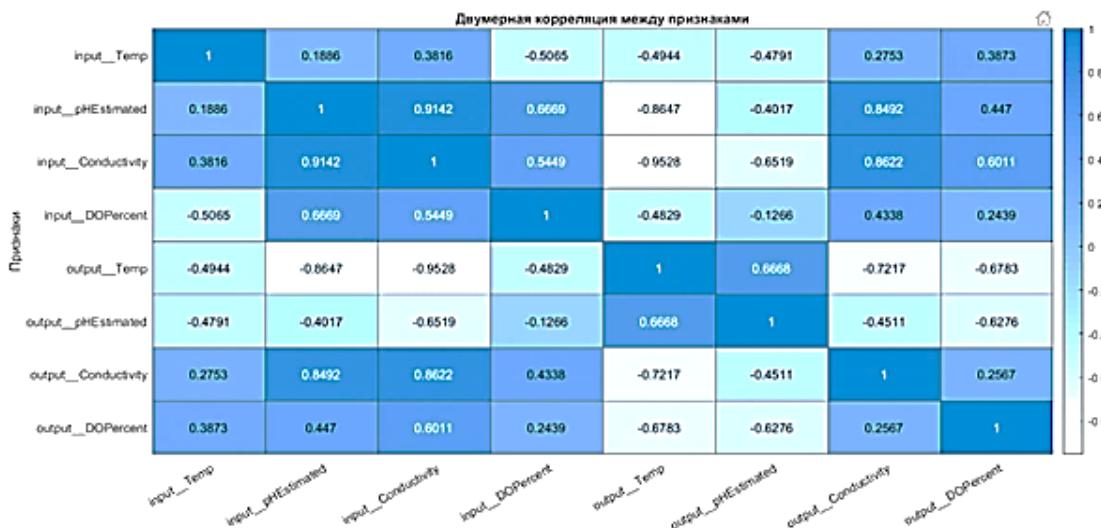


Рис. 3. Двумерная корреляция показателей качества сточных вод кондитерского цеха в тонкослойном отстойнике

На рис. 4 показатель электропроводности на выходе из отстойника указывает на сильную корреляцию с показателями pH (0,7102), средние корреляции – с показателями электропроводности (0,5667) и растворенного кислорода (0,5671) – в исходной сточной воде.

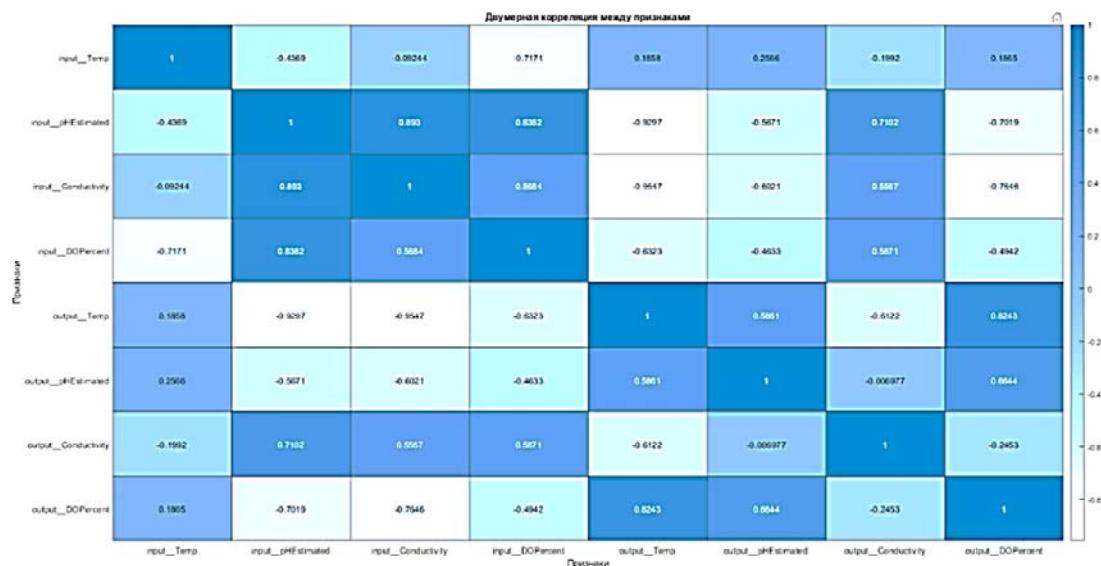


Рис. 4. Двумерная корреляция показателей качества сточных вод хлебопекарного цеха в тонкослойном отстойнике

На рис. 5 показатель электропроводности на выходе из отстойника отображает сильную корреляцию с показателями температуры (0,8879) и электропроводности (0,7415) в исходной сточной воде и среднюю корреляцию – с показателем pH (0,5509) и растворенного кислорода (0,6384).

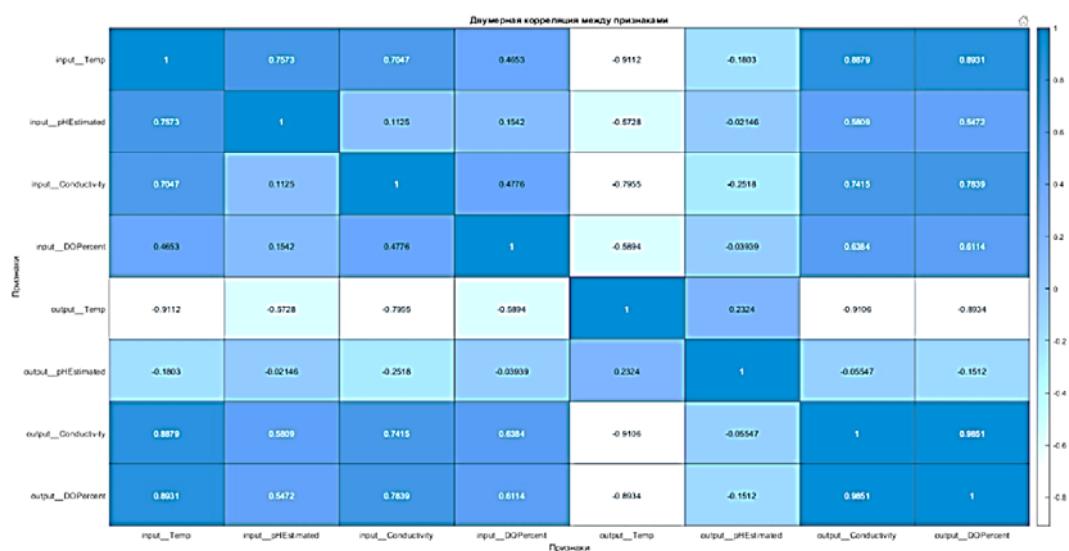


Рис. 5. Двумерная корреляция показателей качества сточных вод смешанного состава в тонкослойном отстойнике

Разработка концептуальной схемы использования физической модели при создании и штатном применении цифрового двойника процессов очистки сточных вод хлебопекарного производства

Анализ матриц корреляции (рис. 3–5) выявил взаимосвязи между параметрами, определяющими качество сточных вод. Наиболее значимыми оказались показатели рН и электропроводности, которые демонстрируют высокую и среднюю степень зависимости между входными и выходными параметрами. Это подтверждает эффективность примененного метода очистки в тонкослойном отстойнике. Данные показатели можно рассматривать в качестве основных для косвенного мониторинга и прогнозирования качества водообработки. Дополнительно, информация о температуре и содержании растворенного кислорода позволяет построить более точные предсказательные модели. Эти показатели можно рассматривать как дополнительные для прогнозирования качества очистки.

Проведенные специалистами Республики Беларусь и России исследования процессов биологической очистки на очистных сооружениях г. Барановичи [14] подтверждают, что сформированные с применением цифровых датчиков базы данных, последующая статистическая обработка временных рядов и установление статистических взаимосвязей между показателями качества СВ дают возможность повысить качество водообработки при организации предиктивного управления.

В работе [15] отмечается, что дискретные измерения показателей качества аналитическими методами на аттестованном оборудовании, выполненные квалифицированным персоналом, ввиду имеющейся на сегодня информационной неполноты также представляют значительную ценность при регулировании процессов обработки сточных вод.

Результаты исследования продемонстрировали, что предлагаемый подход с использованием цифровых датчиков и математической обработки как непрерывных, так и дискретных выборок позволяет эффективно выявлять характер изменения параметров воды [16], что создает перспективные возможности для разработки цифровых моделей на основе технологий интеллектуального мониторинга и прогнозирования качества очистки сточных вод.

Опираясь на общие принципы проектирования цифровых двойников производства в соответствии с международными стандартами серии ISO 23247 [ISO 23247-1, ISO 23247-2], обосновуем, что для дальнейшего развития интеллектуального мониторинга с использованием физического моделирования ЛОС целесообразно выбрать два направления. Во-первых, применение интеллектуального мониторинга на этапе разработки ресурсоэффективных очистных сооружений (рис. 6). Как показывают результаты проведенных экспериментальных исследований с использованием физических моделей, оснащенных цифровыми сенсорами, апробированный подход позволяет последовательно формировать базы данных для разработки схем ЛОС, одновременно восполняя пробелы в выборе контролируемых параметров систем интеллектуального мониторинга. Можно предположить, что в условиях ограниченных ресурсов и при невозможности сбора информации на реальных объектах это дает возможность существенно упростить создание цифровых двойников процессов локальных систем очистки сточных вод на промышленных объектах, обеспечивая их имитационные исследования до размещения на реальных объектах.



Рис. 6. Структурная схема создания цифрового двойника очистных сооружений на этапе разработки и проектирования с использованием физических моделей:
ЦД – цифровой двойник

Во-вторых, создание интеллектуальной системы мониторинга качества очистки сточных вод с цифровыми сенсорами является определяющим принципом для цифрового двойника процессов ЛОС на этапе штатного функционирования (рис. 6), так как формирует необходимую базу для представления информации о предыдущих состояниях процессов очистки и предсказания их будущих состояний и представляет собой базис конвергенции физического объекта и виртуальной модели. Предлагаемая концептуальная модель в равной степени может быть применена как для локальных, так и для комплексных очистных сооружений.

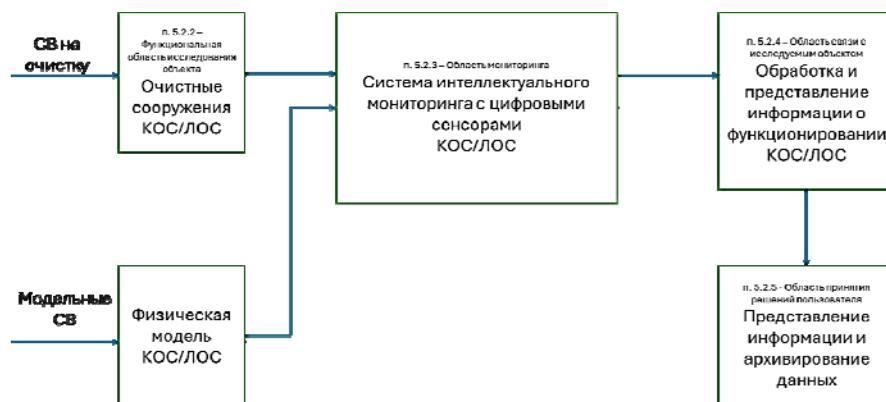


Рис. 7. Концептуальная модель цифрового двойника очистных сооружений на этапе функционирования в соответствии с общими принципами ISO 23247-2 : 2021:
КОС – комплексные очистные сооружения

Следует указать, что представление и архивирование данных позволит:

- повысить эффективность процессов очистки, снизить риски и соответствующие затраты при опасных отклонениях контролируемых показателей качества от заданных значений (адаптивно корректируемых);
- реализовать оперативную аналитическую обработку данных (online analytical processing-OLAP) процессов на ЛОС, применяя технологию обработки, заключающуюся в подготовке агрегированной информации на основе больших массивов данных, структурированных по многомерному принципу.

Заключение

В результате выполненного комплекса физических и математических исследований сформированы наборы данных, состоящие из 36 000 измерений, и определены показатели, имеющие наибольшее влияние при прогнозировании качества очистки сточных вод в тонкослойных отстойниках. Для сточных вод предприятий хлебопекарной отрасли в качестве таких показателей можно назвать показатели pH и электропроводности. В ходе исследования продемонстрирована эффективность использования цифровых датчиков для мониторинга качества сточных вод. При анализе данных очистки сточных вод кондитерского цеха выявлена сильная корреляция между показателями электропроводности после отстойника и значениями pH (0,8492), а также электропроводностью (0,8622) в исходной сточной воде. Также наблюдалась умеренная связь с уровнем растворенного кислорода (0,4338) в исходной сточной воде. В случае анализа сточных вод хлебопекарного цеха электропроводность показывала сильную зависимость от pH (0,7102) и умеренную связь с электропроводностью (0,5667) и уровнем растворенного кислорода (0,5671) в исходной воде. Для производства со смешанными стоками характерна сильная корреляция электропроводности с температурой (0,8879) и электропроводностью исходной сточной воды (0,7415), а также умеренная связь с pH (0,5509) и уровнем растворенного кислорода (0,6384).

Созданный и обоснованный концептуальный подход проектирования ЦД процессов ЛОС формирует предпосылки для развития цифрового моделирования, поддерживая конвергенцию между физическим моделированием и виртуальной частью цифровых продуктов, также и в условиях штатного функционирования очистных сооружений промышленных предприятий. Данный подход обладает потенциалом для широкого применения в экологических проектах, направленных на управление качеством очистки сточных вод, поскольку создает теоретическую основу для реализации OLAP на ЛОС, что позволяет повысить эффективность процессов очистки, снизить риски и соответствующие затраты при опасных отклонениях контролируемых показателей качества от заданных адаптивно корректируемых значений.

Можно отметить, что в дальнейших исследованиях необходимо делать акцент на формировании объектно-ориентированного методического обеспечения для построения математических моделей виртуальной части цифровых двойников.

Литература

1. О водоснабжении и водоотведении : Федер. закон от 7 дек. 2011 г. № 416-ФЗ : в ред. от 8 авг. 2024 г. : с изм. и доп., вступ. в силу с 1 сент. 2024 г. // КонсультантПлюс. Россия (дата обращения: 08.12.2024).
2. Федеральная служба государственной статистики. – URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 08.12.2024).
3. Вода России. – URL: <https://goo.su/wknUb13> (дата обращения: 08.12.2024).

4. Artificial intelligence and machine learning-based monitoring and design of biological wastewater treatment systems / N. K. Singh, M. G. Yadav, V. Singh [et al.] // *Bioresourse Technology*. – 2022. – Vol. 369. – DOI 10.1016/j.biortech.2022.128486
5. A Review of Computational Modeling in Wastewater Treatment Processes / M. Salomé Duarte, G. Martins, P. Oliveira [et. al] // *ACS ES & T Water*. – Vol. 4. – DOI 10.1021/acsestwater.3c00117
6. Zhu, B. COD Prediction Model for Wastewater Treatment Based on Particle Swarm Algorithm / B. Zhu // Proceedings – 2023 Asia-Europe Conference on Electronics, Data Processing and Informatics (ACEDPI), Prague, April 17–19 2023 / Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. – Prague, 2023. – P. 454–459. – DOI 10.1109/ACEDPI58926.2023.00093
7. Wang, K.-J. A data-driven optimization model for coagulant dosage decision in industrial wastewater treatment / K.-J. Wang, P.-S. Wang, H.-P. Nguyen // *Computers & Chemical Engineering*. – 2021. – Vol. 152. – DOI 10.1016/j.compchemeng.2021.107383
8. Applications of machine learning algorithms for biological wastewater treatment: Updates and perspectives / B. Sundui, O. A. Ramires Calderon, O. M. Abdeldayem // *Clean Technol Environ Policy*. – 2021. – Vol. 23, N 1. – P. 1–17. – DOI 10.1007/s10098-020-01993-x
9. Raciti, M. Anomaly Detection in Water Management Systems / M. Raciti, J. Cucurull, S. Nadjm-Tehrani // In: *Critical Infrastructure Protection* ; eds.: J. Lopez, R. Setola, S. D. Wolthusen. – Berlin ; Heidelberg : Springer, 2012. – P. 98–119. – DOI 10.1007/978-3-642-28920-0_6. – (Lecture Notes in Computer Science (LNCS ; Vol. 7130)).
10. Hybrid differential equations: integrating mechanistic and data-driven techniques for modelling of water systems / W. Quaghebeur, E. Torfs, B. De Baets, I. Nopens // *Water research*. – 2022. – Vol. 213. – P. 118166. – DOI 10.1016/j.watres.2022.118166
11. Lowe, M. A Review on Machine Learning, Artificial Intelligence, and Smart Technology in Water Treatment and Monitoring / M. Lowe, R. Qin, X. Mao // *Water*. – 2022. – Vol. 14. – P. 1384. – DOI 10.3390/w14091384
12. Wasp mote Plug & Sense! Smart Water. – URL: https://development.libelium.com/smart_water_sensor_guide/wasp mote-plug-amp-sense (дата обращения: 08.12.2024).
13. Semenova, T. S. Simulation modeling as a tool for predicting the quality of wastewater treatment in food production / T. S Semenova., A. E. Didikov, O. I. Sergienko // *E3S Web of Conferences*. – 2024. – Vol. 524. – P. 7. – DOI 10.1051/e3sconf/202452402019
14. Предиктивное управление процессом биологической очистки сточных вод на основе нейросетевого прогнозирования pH / В. Н. Штепа, В. А. Кудинов, О. Н. Прокопеня // *Вестник Брестского государственного технического университета*. – 2024. – № 1 (133). – С. 149–155.
15. Штепа, В. Н. Структурное и алгоритмическое обеспечение использования нейронных сетей для контроля функционирования биологических очистных сооружений / В. Н. Штепа, В. Д. Ющенко, А. В. Галузо // *Информационно-коммуникационные технологии: достижения, проблемы, инновации (ИКТ-2024) : электрон. сб. ст. III Междунар. науч.-практ. конф.*, г. Полоцк, 29 марта 2024 г. / Полоцк. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой. – Новополоцк, 2024. – С. 146–150.

References

1. On Water Supply and Sanitation: Federal Law No. 416-FZ: with revisions dated 08.08.2024, effective from 01.09.2024. *Konsul'tantPlyus*. 2025 (accessed 08 December 2024) (in Russian).
2. *Federal Service of State Statistics*. Available at: <https://rosstat.gov.ru/> (accessed 08 December 2024) (in Russian).
3. *Water of Russia*. Available at: <https://goo.su/wknUb13> (accessed 08 December 2024) (in Russian).

4. Singh N. K., Yadav M. G., Singh V., Hirendrasinh P., Vinod K., Shashi K. Bh. Artificial intelligence and machine learning-based monitoring and design of biological wastewater treatment systems. *Bioresource Technology*, 2022, vol. 369. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128486>
5. Duarte M. S., Martins G., Oliveira P., Fernandes B., Ferreira E. C., Alves M. M., Lopes F., Pereira M. A., Novais P. A Review of Computational Modeling in Wastewater Treatment Processes. *ACS ES&T Water*, 2023, vol. 4. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.3c00117>
6. Zhu B. COD Prediction Model for Wastewater Treatment Based on Particle Swarm Algorithm. *Proceedings – 2023 Asia-Europe Conference on Electronics, Data Processing and Informatics (ACEDPI), Prague, April 17–19 2023*. Prague, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2023, pp. 454–459. <https://doi.org/10.1109/ACEDPI58926.2023.00093>
7. Wang K.-J., Wang P.-S., Nguyen H.-P. A data-driven optimization model for coagulant dosage decision in industrial wastewater treatment. *Computers & Chemical Engineering*, 2021, vol. 152. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107383>
8. Sundui B., Ramires Calderon O. A., Abdeldayem O. M. Applications of machine learning algorithms for biological wastewater treatment: Updates and perspectives. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2021, vol. 23, no. 1, pp. 1–17. <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01993-x>
9. Raciti M., Cucurull J., Nadjm-Tehrani S. *Anomaly Detection in Water Management Systems*. Eds. Lopez J., Setola R., Wolthusen S. D. Berlin, Heidelberg, Springer Publ., 2012, vol. 7130, pp. 98–119. https://doi.org/10.1007/978-3-642-28920-0_6
10. Quaghebeur W., Torfs E., De Baets B., Nopens I. Hybrid differential equations: integrating mechanistic and data-driven techniques for modelling of water systems. *Water Research*, 2022, vol. 213, p. 118166. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118166>
11. Lowe M., Qin R., Mao X. A Review on Machine Learning, Artificial Intelligence, and Smart Technology in Water Treatment and Monitoring. *Water*, 2022, vol. 14, p. 1384. <https://doi.org/10.3390/w14091384>
12. *Wasp mote Plug & Sense! Smart Water*. Available at: https://development.libelium.com/smart_water_sensor_guide/wasp mote-plug-amp-sense (accessed 08 December 2024).
13. Semenova T. S., Didikov A. E., Sergienko O. I. Simulation modeling as a tool for predicting the quality of wastewater treatment in food production. *E3S Web of Conferences*, 2024, vol. 524, p. 7. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202452402019>
14. Shtepa V. N., Kudinov V. A., Prokopenya O. N. Predictive control of the biological wastewater treatment process based on neural network pH forecasting. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2024, no. 1 (133), pp. 149–155 (in Russian).
15. Shtepa V. N., Yushchenko V. D., Galuzo A. V. Structural and algorithmic support for using neural networks to monitor the operation of biological treatment facilities. *Informatsionno-kommunikatsionnye tekhnologii: dostizheniya, problemy, innovatsii (IKT-2024): elektron. sb. st. III Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., g. Polotsk, 29 marta 2024 g.* [Information and Communication Technologies: Achievements, Problems, Innovations (ICT-2024): Electronic Collection of Articles of the III International Scientific and Practical Conf., Polotsk, March 29, 2024]. Novopolotsk, 2024, pp. 146–150 (in Russian).