

РАЗРАБОТКА ШАБЛОНА ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ДЛЯ ТИПОВЫХ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ СТОЧНЫХ ВОД НА МАЛЫХ ПИЩЕВЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Кармакова Е. С.¹

Научный руководитель – доцент Семенова Т. С.¹

¹Университет ИТМО

karmakovak1303@gmail.com

Введение

Малые пищевые предприятия в условиях интенсивного производства испытывают значительные сложности при управлении очистными сооружениями сточных вод (ОСВ). Основные трудности связаны с неэффективным использованием водных ресурсов, частыми простоями оборудования и значительными потерями сырья из-за утечек в трубопроводах и резервуарах. Кроме того, неоптимальные потоки сточных вод приводят к повышенному энергопотреблению насосов и систем очистки, а также к рискам экологического характера, таким как несоответствие нормативным требованиям по качеству сбросов. Внедрение цифровых двойников позволяет создать виртуальную реплику реальных процессов ОСВ, обеспечивая мониторинг в реальном времени и оптимизацию режимов работы [1].

В научных и прикладных исследованиях по цифровизации пищевой промышленности отмечается, что цифровые двойники рассматриваются как ключевой элемент архитектуры "умного" пищевого производства, где единое цифровое представление процессов поддерживает сквозную прослеживаемость, контроль качества и прогнозирование последствий изменений в технологии. Для объектов ОССВ это означает возможность рассматривать систему не как отдельный вспомогательный участок, а как интегрированную часть производственного контура, влияющую на эффективность всего предприятия. В этом контексте разработка стандартизированного шаблона цифрового двойника типовых ОСВ для малых пищевых предприятий выглядит актуальной задачей, так как позволяет сократить порог входа в технологии индустрии 4.0 и адаптировать проверенные подходы к условиям ограниченных ресурсов малого бизнеса [3].

Основная часть

Модульный шаблон цифрового двойника разработан на платформе AnyLogic (Россия; The AnyLogic Company) с использованием комбинации парадигм агентного и дискретно-событийного моделирования. Цифровой двойник функционирует как динамическая виртуальная модель физической системы ОСВ, синхронизированная с реальными данными в реальном времени. Он состоит из трёх ключевых уровней – уровня данных, уровня моделирования и уровня анализа. На уровне данных происходит импорт данных или напрямую от IoT-датчиков (параметры расхода, уровня загрязнённости, температуры, давления). Данные поступают в формате CSV или JSON, автоматически преобразуются в параметры агентов AnyLogic с помощью встроенного парсера и калибруются по историческим данным для обеспечения точности модели [2].

Визуализация обеспечивает интуитивное представление процессов – 2D-графики потоков, 3D-модели оборудования с распределением нагрузок и анимацией движения стоков. Пользователь может взаимодействовать с моделью через интерфейс AnyLogic Experiment Manager, переключая виды и масштабы в зависимости от задач.

Симуляция сценариев "что если" построена на методе Монте-Карло: генерируются тысячи итераций с вариацией входных параметров (например, изменение объёма производства или отказ насоса), что позволяет прогнозировать поведение системы при нештатных ситуациях. Интеграция Python API расширяет возможности – применяются

алгоритмы машинного обучения (регрессия, кластеризация) для предиктивного анализа поломок и оптимизации энергопотребления. Шаблон адаптируется к типовым ОСВ путём модульной сборки: базовый модуль потоков дополняется специфическими блоками для пищевого производства (очистка от жиров, органики), с экспортом результатов в отчёты или дашборды [3].

Выводы

Разработанный модульный шаблон цифрового двойника представляет собой комплексное решение для решения проблем ОСВ на малых пищевых предприятиях. Он сочетает современные методы моделирования в AnyLogic с практическими требованиями отрасли, обеспечивая визуализацию, прогнозирование и оптимизацию без значительных инвестиций. Перспективы использования включают пилотное внедрение на реальных объектах в России, интеграцию с системами промышленного Интернета вещей и расширение функционала за счёт искусственного интеллекта для автоматизированного управления. Это позволит повысить конкурентоспособность малых предприятий, снизить экологическую нагрузку и внести вклад в цифровизацию пищевой промышленности в соответствии с национальными программами устойчивого развития.

Литература

1. Maheshwari, Pratik; Kamble, Sachin. Digital twin-driven real-time planning, monitoring, and controlling in food supply chains // Technological Forecasting and Social Change – 2023.
2. Боровкова А. И. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности : монография / под ред. – Санкт-Петербург : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. – 492 с.
3. INNER : Цифровой двойник производственной линии в пищевой промышленности: понятие, преимущества и примеры внедрения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://inner.su/articles/tsifrovoy-dvoynik-proizvodstvennoy-linii-v-pishchevoy-promyshlennosti-ponyatie-preimushchestva-i-pri/> (Дата обращения 15.02.2026).