

01-25

ISSN 1818-9830



ВЕСТНИК

ФОНДА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

VESTNIK

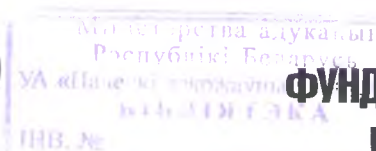
OF THE FOUNDATION FOR FUNDAMENTAL RESEARCH

I/2025



Научно-теоретический и информационно-методический журнал
Белорусского республиканского фонда
фундаментальных исследований

Издается с III квартала 1997 г.



ВЕСТНИК
ФОНДА
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

№ 1 [111], 2025

Зарегистрирован
в Министерстве информации
Республики Беларусь,
свидетельство о регистрации
№ 426 от 29.05.2009

Учредители:

Национальная академия
наук Беларуси,
Белорусский
республиканский
фонд
фундаментальных
исследований

220072, г. Минск,
пр. Независимости, 66;
тел. 379-93-56,
357-25-08

Издатель:

РУП «Издательский дом
«Беларуская навука»

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор

А. Е. Дайнеко

Заместитель главного редактора

А. В. Пилипук

Ответственный секретарь

Н. Н. Костюкович

Ведущий редактор журнала

Т. П. Петрович

Члены редколлегии:

А. В. Бильдюкевич	А. И. Локотко
В. Г. Богдан	Н. П. Митьковская
С. В. Гапоненко	В. А. Орлович
И. А. Голуб	В. Е. Падутов
В. Л. Гурский	О. Г. Пенязьков
Е. В. Гусаков	В. Г. Сафонов
В. Г. Залесский	А. В. Труханов
А. Ф. Ильющенко	А. В. Тузиков
И. А. Карпов	Ю. С. Харин
А. А. Коваленя	А. Г. Шумилин
Н. П. Крутько	С. С. Щербаков

Минск, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ДЕНЬ БЕЛОРУССКОЙ НАУКИ

Поздравление Председателя Президиума Национальной академии наук Беларуси с Днем белорусской науки	9
---	---

ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ФОНДА

Дайнеко А. Е., Костюкович Н. Н., Половинко Н. Н., Титова Е. Т. Основные итоги деятельности Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований в 2024 году	11
---	----

МЕЖДУНАРОДНЫЕ СВЯЗИ

Соглашение о научном сотрудничестве между Объединенным институтом ядерных исследований и Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований.....	34
---	----

ИТОГИ КОНКУРСОВ

Конкурс совместных научных проектов Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Вьетнамской академии наук и технологий «БРФФИ–ВАНТ-2025»	37
Конкурс совместных научных проектов Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Национального фонда естественных наук Китая «БРФФИ–НФЕНК-2025»	40

КОНКУРСЫ БРФФИ: НОРМАТИВНАЯ БАЗА

Условия совместного конкурса фундаментальных исследований Национальной академии наук Беларуси и Вьетнамской академии наук и технологий «НАНБ (БРФФИ)–ВАНТ-2025»	45
Условия республиканского тематического конкурса на соискание грантов Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований для молодых ученых «Искусственный интеллект М-2025»	51
Условия конкурса совместных научных проектов Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Вьетнамской академии наук и технологий «БРФФИ–ВАНТ-2026»	57

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

Колбас А. П., Колбас Н. Ю., Качанович П. В., Кайдалова М. О., Дашкевич М. М., Синчук О. В. Оценка содержания тяжелых металлов в компонентах садовых агроэкосистем Брестского региона	64
--	----

Войтов И. В., Штепа В. Н., Козырь А. В., Шикунец А. Б. Методика и программное обеспечение цифровизации систем водоотведения водопроводно-канализационных хозяйств.....	74
Лысенко С. А., Мельник В. И., Бровка Ю. А., Хитриков М. А., Буяков И. В. Современное состояние климата Белорусского Полесья и прогнозы его изменений на период до 2050 года	91
Кипень В. Н., Снытков Е. В. Однонуклеотидный полиморфизм для дифференциации образцов дикого кабана и домашней свиньи на основании результатов биоинформатического анализа геномов.....	107
Замковец А. Д., Баран Л. В., Малютин-Бронская В. В., Кузьмицкая А. С., Фролов И. Ю. Оптические и электрофизические свойства гранулированных наноструктур серебра на подложках из германия	115
Минчукова О. Ф., Желудкевич А. Л., Абдулхаев Х. Г., Мансуров М. Т., Косимов К. З. Влияние термообработки на микроструктуру и прочностные характеристики стали марки 45Г	123
Роткович А. А., Тишкевич Д. И., Рязанов И. В., Вершинина Т. Н., Бондарук А. А., Герман С. А., Труханов А. В. Исследование структурно-морфологических особенностей композиционных материалов на основе вольфрама в полимерных матрицах для защиты от гамма-излучения	129
Панков Д. А., Крупенко Ю. В. Моделирование деятельности страховой организации с учетом цифровизации	142
Дайнеко А. Е., Карпович Н. В. Методология прогнозирования внешнеторговых потоков агропродовольственных товаров Беларуси.....	150
Макуценя Е. П. Экспортная конкурентоспособность агропродовольственных товаров в условиях глобализации.....	164

НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ

Сушко В. И. Корпоративные системы организации научных исследований в крупнейших глобальных продовольственных ТНК	172
---	-----

ЮБИЛЕИ ИЗВЕСТНЫХ УЧЕНЫХ

Костюкович Н. Н. Нобелевский лауреат Леон Н. Купер: пионер сверхпроводимости и нейронауки с белорусскими корнями	191
---	-----

УДК 628.3:621.3

И. В. ВОЙТОВ¹, В. Н. ШТЕПА¹, А. В. КОЗЫРЬ², А. Б. ШИКУНЕЦ²**МЕТОДИКА И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ЦИФРОВИЗАЦИИ СИСТЕМ ВОДООТВЕДЕНИЯ
ВОДОПРОВОДНО-КАНАЛИЗАЦИОННЫХ ХОЗЯЙСТВ**¹Белорусский государственный технологический университет²Полесский государственный университет

(Поступила в редакцию 05.02.2025)

Ключевой недостаток решений-аналогов в сфере управления водоотведением населенных пунктов – отсутствие комплексного и оперативного подхода в разрезе «мониторинг экологической ситуации – хранение и анализ данных – принятие решений в режиме реального времени об экологической эффективности водоотведения» и фактическое отсутствие последнего элемента в такой цепочке, что создает экологическую опасность для водных объектов. Уже на этапе первичной математической обработки данных, собранных разработанной и внедренной на водопроводно-канализационном хозяйстве (ВКХ) информационной системой, удалось определить подходы по идентификации «образов» ключевых объектов-загрязнителей сточных вод, отходы которых представляют значительную экологическую опасность для окружающей среды, поскольку вызывают гибель активного ила (АИ) коммунальных очистных сооружений (КОС). Оценка результатов физического моделирования процессов водоотведения позволила выявить, что при цифровизации объектов ВКХ необходимо акцентировать внимание на превентивном устранении потенциального (фактического) негативного воздействия на АИ КОС сточных вод отдельных абонентов-предприятий. Основанная на таких выводах и созданная методика цифровизации систем водоотведения с использованием критерия экологической эффективности очистки, стала теоретическим базисом разработки и внедрения информационно-аналитического программного обеспечения, выполняющего локальные задачи: интеллектуальные мониторинг и прогнозирование, поддержку принятия решений при регулировании технологических процессов. Функционирование продуктовых решений реализовано с использованием математических подходов искусственного интеллекта: нейронных сетей и казуального моделирования.

Введение. Среди отечественных нормативных документов, которые регулируют коммунальное водоотведение как базовые, можно выделить: «Водный кодекс Республики Беларусь» (30 апреля 2014 г. № 149-З) и строительные нормы

(СН) 4.01.02-2019 «Канализация. Наружные сети и сооружения». Первый документ имеет строгие концептуальные обоснования и требования необходимости экологического, в том числе локального, мониторинга на разных этапах жизненных циклов систем водоотведения разнопрофильных объектов, включая очистные сооружения (ОС) (статьи кодекса: 6, 23, 24, 47, 50, 56). В СН 4.01.02-2019 в статье 10 «Очистные сооружения» указывается, что проектирование ОС должно выполняться на основе исследований и научных рекомендаций при обязательном внедрении автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) и оборудования мониторинга показателей качества сточных вод.

Из зарубежных документов в указанной проблемной области для изучения были выбраны: ISO 24525:2022 «Drinking water, wastewater and stormwater systems and services – Operation and maintenance of on-site domestic wastewater services», ISO 24521:2016 «Activities relating to drinking water and wastewater services – Guidelines for the management of basic on-site domestic wastewater services», ISO 9001:2015 «Quality management systems – Requirements».

Сравнение отечественной и зарубежной нормативных баз обосновывает следующие направления улучшения белорусских документов: необходимость большей детализации использования информационных технологий при обработке больших массивов данных; включение требований по внедрению в водопроводно-канализационные хозяйства (ВКХ) аппаратно-программных систем для оперативного и распределенного учета и анализа показателей качества транспортируемых сточных вод, а не только на ОС; формирование системных требований касательно прогнозирования в режиме реального времени (РРВ) изменения значений загрязнителей сточных вод путем интеграции в существующие (проектируемые) специализированные АСУ ТП прогностических блоков.

Среди решений-аналогов были проанализированы следующие программные продукты: ArcGIS, MapInfo, qGIS, ГИС Zulu, ГИС GeoLink, GRASS (ГИС), CityCom, IndorGIS, SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), TRACE MODE, SIMATIC WinCC Open Architecture (WinCC OA). Установлено, что они имеют иерархическую структуру, как правило, включают следующие составляющие [1; 2]: измерительные (сенсорные) блоки; блоки передачи информации, интерфейсные преобразователи; линии передачи информации; контроллерные блоки; базы данных; специализированное программное обеспечение (управление, отображение информации, анализ данных, формирование отчетов, геопозиционирование и ряд других). При этом решаемые производственные задачи такими программными продуктами в рамках цифровизации ВКХ следующие [3]: привязка к картографии; регулирование отдельных технологических процессов; мониторинг параметров (как правило, состояния оборудования); поддержка административно-организационной, бухгалтерской и планово-экономической деятельности. Ключевой недостаток решений-аналогов – отсутствие комплексного и оперативного подхода в разрезе «мониторинг экологической ситуации – хранение и анализ данных – принятие решений в РРВ об экологической эффективно-

сти водоотведения» и фактическое отсутствие последнего элемента в такой цепочке, что создает экологическую опасность для водных объектов.

Соответственно, исследования, нацеленные на создание методического обеспечения, которое выступит базисным для продуктовых информационных решений, является актуальной научно-практической задачей.

Цель исследований – снижение техногенной нагрузки населенных пунктов на окружающую среду путем управления экологической безопасностью процессов водоотведения с учетом требований экологической эффективности очистных сооружений на основе использования интеллектуальных программно-аппаратных комплексов.

Обоснование информационно-статистического базиса для создания методического обеспечения цифровизации водоотведения. С целью устранения недостатков прототипов и улучшения экологической безопасности водоотведения предлагается следующая укрупненная структура специализированных информационно-управляющих систем (рис. 1).

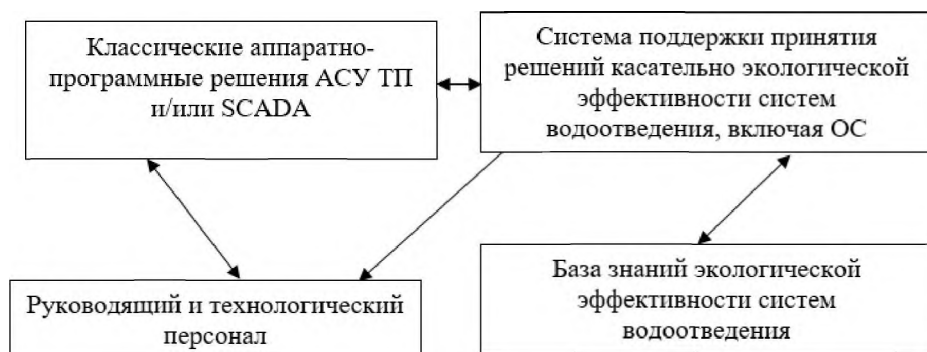


Рис. 1. Структура информационно-управляющих систем водоотведения

Анализ динамики изменения показателей качества сточных вод на входе биологических коммунальных очистных сооружений (КОС) г. Барановичи (имеются значительные экологические риски для природных водных ресурсов), показал, что величины загрязнителей изменяются нелинейно, стохастично, нестационарно, в несоответствии с нормальным законом распределения, с большими (даже в несколько часов) продолжительными амплитудными выбросами (в некоторых случаях более 60 % от математического ожидания). Специализированное программное обеспечение (ПО) было создано на языке Python с использованием кросс-платформенного фреймворка Qt (рис. 2). При таком подходе учитывалось, что использование Python облегчает подключение множества различных научных и других модулей для анализа данных, машинного обучения. Также применение Qt позволяет не зависеть от платформы: ПО может работать на разных операционных системах (Windows, Linux, MacOS).

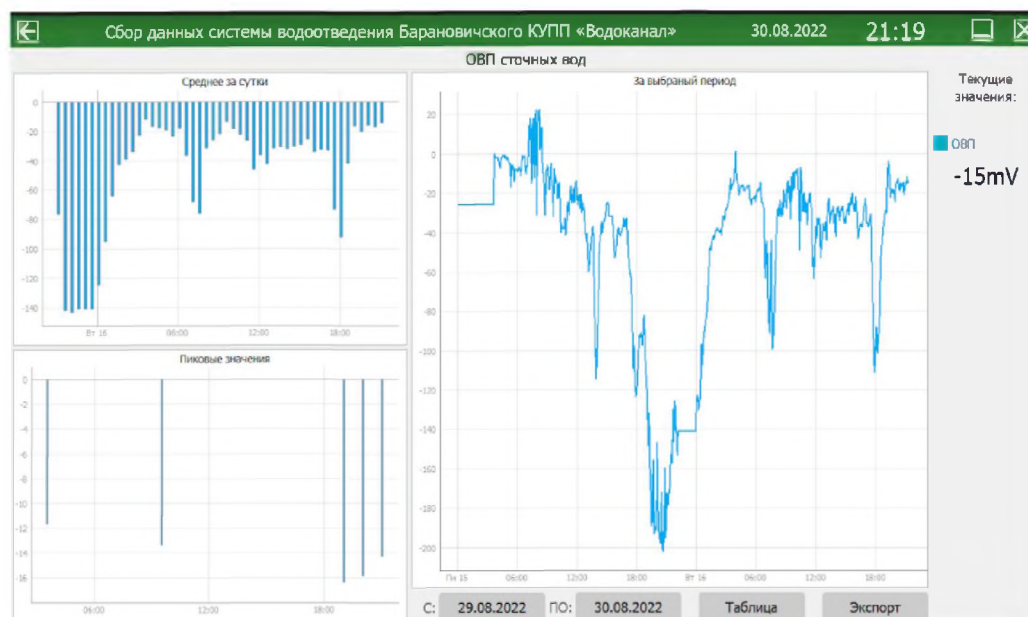


Рис. 2. Интерфейс программного обеспечения фиксации и визуализации технологических показателей сточных вод

Таким образом, на основе определенных нелинейности и нестационарности процессов для создания профильных моделей обосновано использовать математический аппарат искусственных нейронных сетей, который демонстрирует эффективность в таких условиях [4; 5].

При проектировании концептуальной схемы информационной системы контроля экологической безопасности коммунального водоотведения использовалась методология IDEF0 – приемы функционального моделирования и графической нотации. На основе технологического анализа выбраны следующие категории параметров (согласно терминологии IDEF0) (рис. 3) [7; 8]: входящие факторы (данные поступают от измерительных средств и лабораторного анализа): качество сточных вод отдельных абонентов, качество сточных вод на входе в очистные сооружения, расход сточных вод, состояние оборудования; управляющие факторы: нормативы требования к абонентам и сбросу в природные водоемы, стоимость ресурсов, паспортные характеристики оборудования; механизмы: технологическое оборудование; результаты: экологическая безопасность и ресурсозатратность системы.

Исходя из контекстной диаграммы (рис. 3), используя программное обеспечение системы сбора и анализа информации [8], применив вейвлет-преобразование с глубиной разложения 8 и порядком 10, выделили сглаженную компоненту сигнала показателя сточных вод (СВ) «рН» (рис. 4).



Рис. 3. Контекстная диаграмма контроля экологической безопасности водоотведения

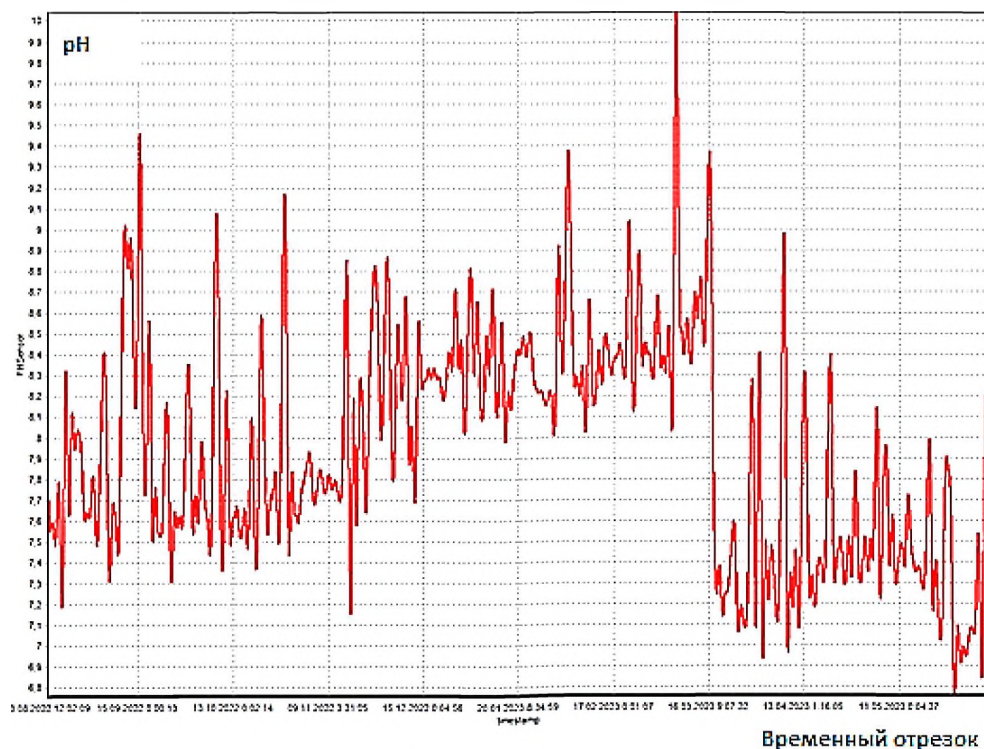


Рис. 4. Визуализация (с использованием вейвлет-преобразования) изменения pH сточных вод системы водоотведения за 8 месяцев

Особый интерес вызывает падение активной реакции на 0,6–0,9 единиц на 5-й месяц регистрации (рис. 4) – такая ситуация должна быть вызвана остановкой водоотведения ключевым объектом(-ами)-загрязнителем(-ями) и изменением технологии формирования СВ. Следующим шагом стал расчет среднеарифметических значений pH для дней недели всего анализируемого отрезка (рис. 5).

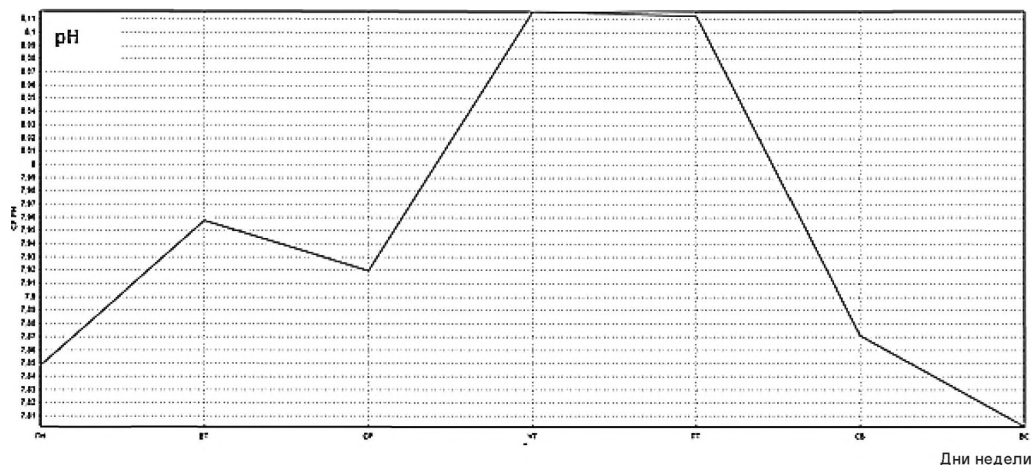


Рис. 5. Визуализация значений pH сточной воды системы водоотведения г. Барановичи по дням недели за 8 месяцев

Оценка рис. 5 приводит к очевидным выводам, что источниками загрязнений СВ, приводящих к щелочному значению активной реакции, выступают объекты, работающие в пятидневном режиме или имеющие ориентированный на такой режим выпуск продукции с использованием в технологических процессах, например, каустика или схожих реагентов.

Применив специализированный пакет математических программ Deductor (аналитическая платформа, созданная для формирования прикладных решений в области анализа данных) для установления влияния других фиксируемых показателей СВ на pH (окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) – RedoxSensor, электропроводимость – ECSensor, температура воды – TPHSensor), провели корреляционный анализ (рис. 6).

Входные поля			Корреляция с выходными полями
№	Г	Поле	PHSensor
1		RedoxSensor	 -0,925
2		ECSensor	 0,502
3		TPHSensor	 0,797

Рис. 6. Корреляционные влияния фиксируемых показателей сточных вод на pH водного раствора (линейная корреляция на основе критерия Пирсона)

Хорошие взаимосвязи между ОВП и pH и значительные между электропроводностью и pH (рис. 6) объясняются исходя из химической теории. В то же время коэффициент корреляции 0,797 между температурой и pH формирует утверждение, что СВ локальных объектов-загрязнителей помимо значительной щелочности характеризуются и высокими значениями температуры.

Тогда, используя архитектуру многослойного персептрона и оптимизационные подходы [9; 10], создана нейросеть (рис. 7).

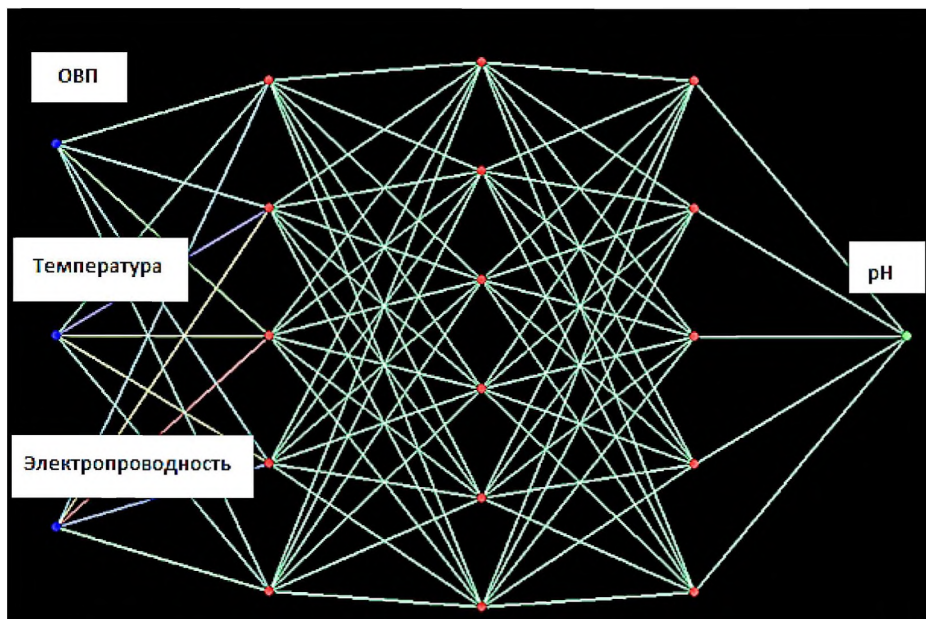


Рис. 7. Архитектура нейронной сети (многослойного персептрона) анализа pH сточной воды

Выполнив линейную нормализацию информационных потоков, удалось достигнуть необходимого процента распознаваемости учебных данных на уровне около 97 % при условии, что данные считаются распознанными при ошибке менее 3 % (500 эпох обучения). Вместе с тем степень отсева амплитудных выбросов является отдельной сложной задачей дальнейших исследований. Созданная нейронная сеть позволяет оперативно анализировать (прогнозировать) влияние других показателей СВ на «pH».

Анализ результатов физического моделирования качества коммунальных сточных вод при их транспортировке в сети водоотведения и обоснование усовершенствованной архитектуры управления таким процессом. Изначально выполнялось физическое моделирование изменения свойств водных растворов, которые транспортируются по сети водоотведения до очистных сооружений. В качестве модельного раствора использовалась сточная вода населенного

пункта (количество жителей – около 140 тысяч), отобранная «в голове» коммунальных очистных сооружений; время – 9:00 (для всех этапов исследований).

Анализ результатов физического моделирования позволяет сделать следующие обобщенные выводы [11]:

показатели качества коммунальных сточных вод под влиянием факторов, имеющих место в сети водоотведения без возмущающих воздействий в виде внешних дополнительных поллютантов, достаточно стабильны и прогнозируемы: флуктуации значений имеют место только для «рН» и «ОВП», что вызвано биохимической многофакторностью формирования их величин и спецификой инструментальных измерений;

в результате комплексных возмущающих воздействий кислот, щелочей, температуры, органических загрязнителей белковой и жировой природ в аэробных условиях имеют место значительные амплитудные колебания показателей водных растворов от значения их математического ожидания: по азоту аммонийному – порядка 10–100 %, по нитритам – порядка 20–50 %, по нитратам – порядка 10–40 %;

в результате комплексных возмущающих воздействий температуры и органических загрязнителей белковой и жировой природ в анаэробных условиях (6 ч перемешивания) имеют место значительные амплитудные колебания показателей водных растворов от значения их математического ожидания только по азоту аммонийному: порядка 20–100 %;

возмущающие воздействия в виде загрязнителей отводимых сточных вод от отдельных абонентов (как правило, промышленных предприятий) при определенных условиях потенциально могут сформировать недопустимые для КОС показатели качества сточных вод на их входе – чему необходимо превентивно противодействовать не только на этапе попадания таких поллютантов в сети водоотведения, но и путем недопущения создания условий формирования вторичных загрязнителей в трубопроводах, канализационных насосных станциях и других технологических узлах канализования.

Тогда в терминах теории автоматического управления [12]:

возмущающие воздействия показателей качества сточных вод на КОС – это значения показателей качества сточных вод, которые вызывают любые воздействия, не предусмотренные технологическими документами процессов водоотведения и ведущие к нарушению технологического режима очистки сточных вод на очистных сооружениях:

контроль по возмущению параметров водоотведения – это измерение показателей качества сточных вод, вызывающих возмущающие воздействия, анализ их отклонения от технологически безопасных для очистных сооружений значений, прогнозирование их влияния на эффективность очистки сточных вод на КОС.

Исходя из исследований [11; 13] и формализованных выше определений, концептуальная модель и методическое обеспечение цифровизации системы водоотведения водопроводно-канализационных хозяйств в сегменте «транспортировка –

очистка сточных вод» на основе критерия экологической эффективности очистных сооружений обоснованно должна создаваться на основе принципа компенсации возмущений, например, согласно методологии Понселя (рис. 8).

Создание методики цифровизации систем водоотведения водопроводно-канализационных хозяйств на основе критерия экологической эффективности очистных сооружений. Методика цифровизации, исходя из концептуальной модели (рис. 8) на основе критерия экологической эффективности очистных соору-



Рис. 8. Концептуальная модель цифровизации системы водоотведения водопроводно-канализационных хозяйств в сегменте «транспортировка – очистка сточных вод» на основе критерия экологической эффективности очистных сооружений в рамках регулирования параметров водоотведения по возмущению: $X_1...X_N$ – показатели качества сточных вод от бытовых и промышленных абонентов, сточные воды которых не оказывают возмущающего воздействия на технологические процессы на КОС; $Z_1...Z_M$ – показатели качества сточных вод от бытовых и промышленных абонентов, сточные воды которых оказывают возмущающее воздействие на технологические процессы на КОС; $ОКZ_1...ОКZ_M$ – показатели качества сточных вод от бытовых и промышленных абонентов, сточные воды которых оказывают возмущающее воздействие на технологические процессы на КОС после организационных мероприятий коррекции такого негативного влияния, КОС; $XZ_1...XZ_M$ – показатели качества сточных вод от бытовых и промышленных абонентов, сточные воды которых оказывают возмущающее воздействие на технологические процессы на КОС после коррекции такого негативного влияния с помощью подходов локальной очистки сточных вод;

Y – комплексные показатели качества сточных вод, отводимых на КОС

жений, должна включать синергетическое использование: предиктивного управления; интеллектуального мониторинга; цифрового моделирования; подходов и принципов проектирования и управления КОС, с учетом особенностей (типа) технологического процесса, с применением современных средств и комплексов измерения, контроля и управления (КИПиА, станции лабораторного контроля, шкафы управления, экспертные заключения).

Задачи такой методики (базируясь на результатах работы ПО сбора и анализа информации (рис. 3–7):

1. Информационно-аналитическое обеспечение проектирования системы водоотведения.

2. Интеллектуальный мониторинг технологических режимов транспортировки и очистки сточных вод, формализация представления всего технологического процесса и его участков, их сложных взаимосвязей, в удобном для анализа и понимания профильных специалистов виде.

3. Оперативная поддержка принятия решений при управлении с возможностью повышения эффективности (экологической и ресурсной) технологического процесса и выбора оптимального способа его интенсификации – на основании адаптивных алгоритмов, в соответствии с предусмотренным законодательством требованиями по предельно допустимым концентрациям достижения максимальной эффективности работы оборудования (воздуходувных агрегатов и т. д.).

4. Интеллектуальный мониторинг эффективности (экологической и ресурсной) технологических процессов, повышение их надежности и оперативности управления технологическими процессами (реакция на внешние возмущения: изменение нагрузок, залповые поступления загрязнителей (включая токсиканты), колебания показателей по биогенным элементам и т. д.) с целью определения и прогнозирования его критических точек.

5. Обеспечение экономической эффективности эксплуатации, технического обслуживания и ремонта (ТОиР) технологических узлов на всех этапах их жизненных циклов (обоснование модернизации и реконструкции) при обеспечении экологической безопасности окружающей среды.

6. Информационно-аналитическая поддержка планово-финансового функционирования ВКХ.

Таким образом, цифровая система должна включать ряд базовых подсистем на основе использования интеллектуальных технологий (рис. 9).

Одно из преимуществ такой цифровой системы будет в том, что ее можно использовать как единое информационно-аналитическое решение уже на этапе проектирования для поддержки работы проектной организации (предпроект, проект) с трансформацией в систему управления уже при запуске и штатной работе тех же КОС.

Укрупненная методика цифровизации сети водоотведения в целом:

Этап 1. Проведение мониторинга объекта внедрения: системный и функциональный анализ, лабораторные исследования, опрос экспертов.

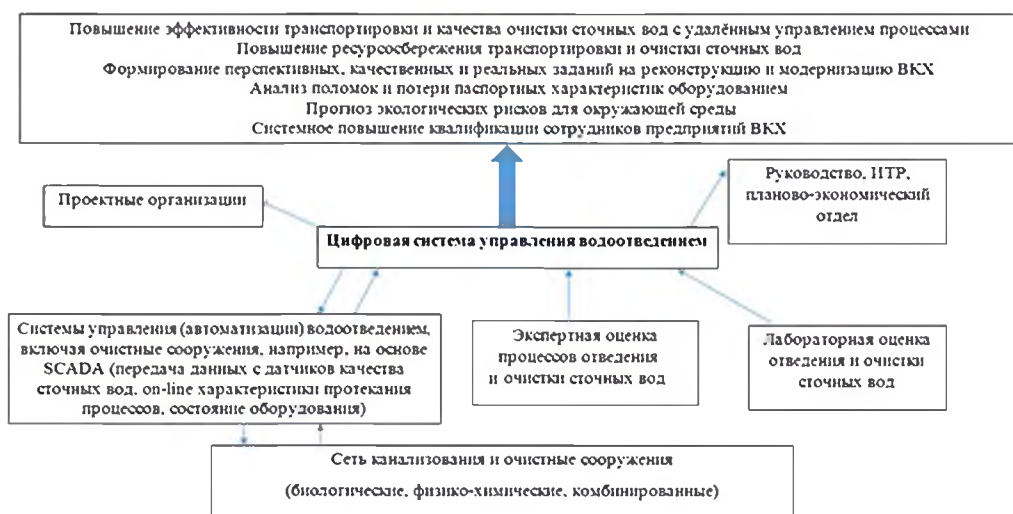


Рис. 9. Структура управления отведением и очисткой сточных вод на основе цифровых технологий и критерия экологической эффективности КОС

Этап 2. Разработка и согласование технического задания (включая аппаратную часть) и программы внедрения цифровой системы.

Этап 3. Создание математических моделей, прикладного программного обеспечения (ППО).

Этап 4. Автономная наладка и предварительные испытания ППО; разработка, согласование и выпуск документации.

Этап 5. Монтаж и наладка аппаратной части цифровой системы; наладка взаимодействия с другими информационными системами.

Этап 6. Адаптация и параметризация математических моделей, баз данных и знаний на объекте.

Этап 7. Создание единой документации цифровой системы.

Этап 8. Проведение отладки цифровой системы: шеф-наладочные работы, корректировка документации по результатам отладки.

Этап 9. Сдача в эксплуатацию цифровой системы.

Этап 10. Разработка методического обеспечения использования и развития цифровой системы, системного обучения персонала.

Этап 11. Сопровождение и обновление цифровой системы, включая повышение квалификации сотрудников ВКХ.

Обоснованная и созданная методика цифровизации водоотведения на основе экологического критерия эффективности КОС позволит разрабатывать и внедрять информационно-аналитическое и программное обеспечение, выполняющее: мониторинг, цифровое моделирование, прогнозирование, поддержку проектирования и принятия решений при управлении (регулировании) технологическими

процессами водоотведения, аккумулирующее данные с существующих (или проектируемых) подсистем канализования и КОС (отдельные технические средства, локальные SCADA, существующие и проектируемые АСУ) и других источников: базы данных аккредитованных лабораторий, результаты физического моделирования, экспертные заключения, смежные системы (АСКУЭ, АСТУЭ).

При этом под экологическим критерием эффективности КОС подразумевается классическое понятие «глубина очистки сточных вод» и сброс (вынос) примесей в водные объекты, которые устанавливаются на основе нормативов: предельно допустимых и временно согласованных выбросов. Показателями качества воды очищенной СВ являются значения концентраций в ней вредных веществ C_r .

Тогда необходимая эффективность очистки сточных вод (η_i) от i -го загрязняющего вещества определяется по формуле

$$\eta_i = \frac{C_{ст} - C_{оч}}{C_{ст}} 100 \%, \quad (1)$$

где $C_{ст}$ – концентрация вещества в сточной воде, поступающей на очистку, мг/л; $C_{оч}$ – концентрация загрязняющего вещества на выходе из устройства, разрешенного к сбросу в водный объект, мг/л.

Эффективность очистки имеет, по существу, смысл коэффициента полезного действия соответствующего устройства. Вследствие большого разнообразия свойств примесей в потоке сточных вод решить задачу нормативно требуемой очистки в каком-либо одном устройстве практически невозможно. Это определяет необходимость применения системы последовательно соединенных аппаратов (h), которая дает общую эффективность по i -й примеси:

$$\eta_{ij} = 1 - (1 - \eta_{i1})(1 - \eta_{i2}) \dots (1 - \eta_{in}), \quad (2)$$

где η_{ij} – эффективность очистки от i -й примеси в j -м устройстве.

Исходя из такого критерия экологической эффективности КОС (1) и (2) предлагается проводить поэтапное внедрение на предприятиях ВКХ методов и технологий повышения их экологической управляемости (например, согласно требованиям ISO 14001: «Система экологического менеджмента» (СЭМ), которые и лягут в основу методики создания технического задания (ТЗ) на их строительство (модернизацию, реконструкцию)) с обязательным учетом рисков возникновения нештатных ситуаций (НС). Усовершенствованная концепция итеративного интегрированного управления СЭМ формирования ТЗ на основе IWRM (Integrated Water Resources Management) представлена на рис. 10.

На первом этапе создания СЭМ предполагается разработка схемы безопасности устойчивого развития на основе водного технологического паспорта предприятия ВКХ с созданием концептуальной модели потоков водных ресурсов и технологических решений (их режимов) воздействия на них: строительство нового предприятия или реконструкция старого не должны вызывать экологический дисбаланс, независимо от отрасли хозяйствования.

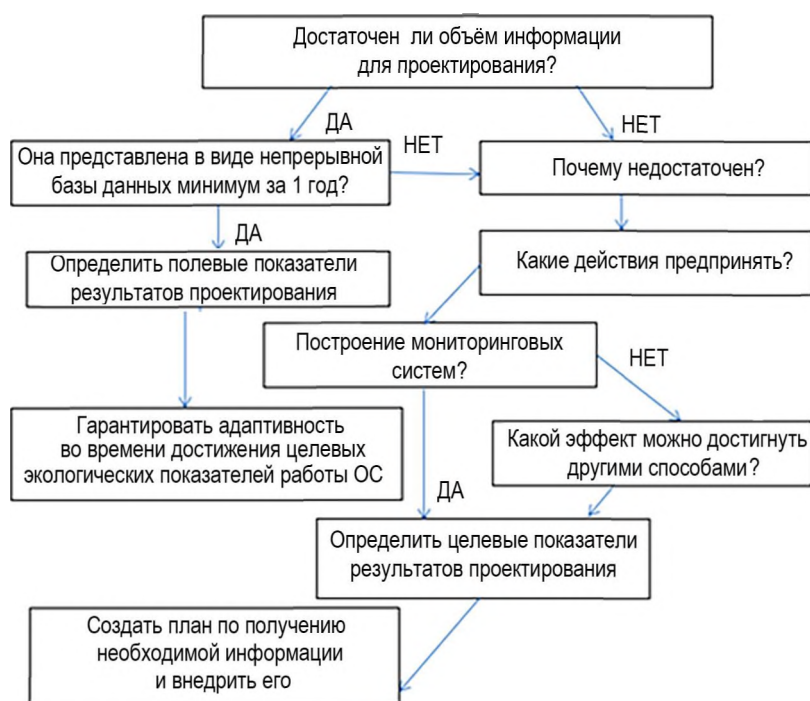


Рис. 10. Усовершенствованная концепция создания технических заданий проектирования очистных сооружений населенных пунктов на основе выполнения экологических требований

Вторым шагом внедрения СЭМ является метод тестирования (оптимизации) созданной на первом этапе модели с учетом потенциального действия НС техногенного и природного характера: исследуются отдельные модели элементов СЭМ (на основе декомпозиции концептуальной), где фиксируются заданные (целевые) параметры, происходит имитационная оценка параметров работы оборудования для транспортировки и очистки воды (в том числе по применению квазинатуральных физических моделей, виртуальных мер и т. п.).

Третья стадия реализации СЭМ (накопление данных для ТЗ) – предпроектная, когда на основании полученных данных составляется бизнес-план с обязательной комплексной оценкой как экономических (например, через индекс рентабельности), так и технологических (энергоэффективность) критериев перспективности проекта КОС.

При этом использование новых и усовершенствованных научно-технических основ нормативной базы промышленных систем водообеспечения позволяет реализовать концепцию интегрированных целей достижения ресурсоэффективного водообеспечения согласно международным системам оценки качества управления предприятиями ВКХ при учете рисков действия НС с использованием распределенных информационных систем (рис. 11).

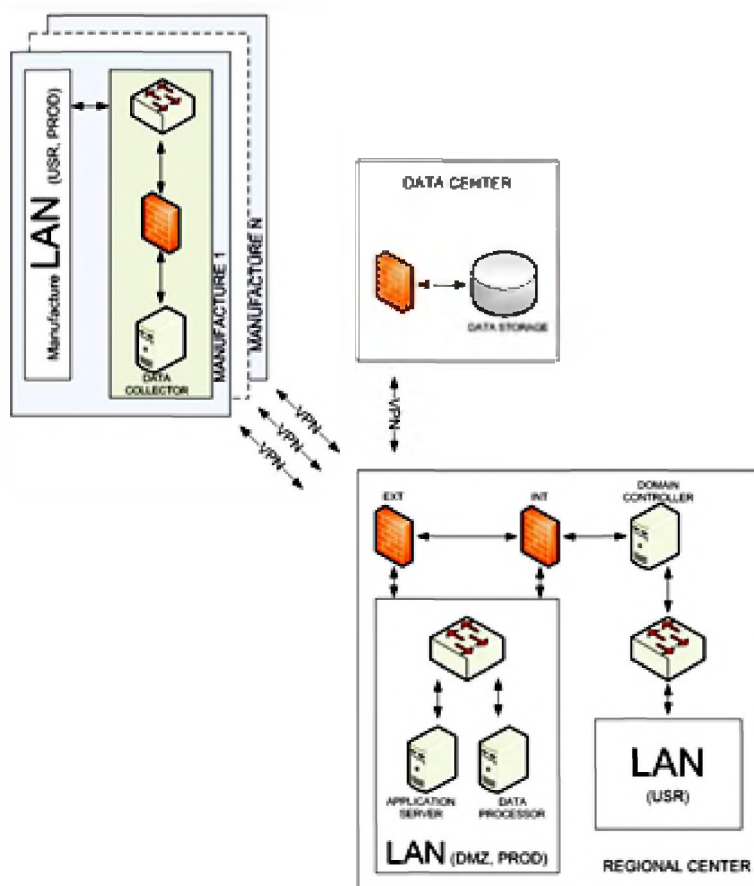


Рис. 11. Пример структуры распределенной информационной системы мониторинга параметров КОС для формирования качественных ТЗ на проектирования

Разработка и апробация интеллектуальных программных продуктов цифровизации водоотведения населенных пунктов. С учетом многопараметричности, сложности формализации, нестационарности, нелинейности процессов, происходящих при очистке сточных вод, синтезировать продуктовые решения, которые бы аналитически поддерживали соответствующее управление, крайне сложно. Одними из важных задач при этом являются: прогнозирование показателей качества СВ, как временных рядов, и регрессионное моделирование работы очистных сооружений. Для таких целей вполне целесообразно разработать программный продукт на основе нейронных сетей.

Созданное решение использует базу SQLite3, которая хранит наборы параметров в одном файле, обеспечивая простоту использования и легкость развертывания. Дополнительно SQLite3 поддерживает стандартный SQL и предоставляет функции для работы с данными, такие как создание таблиц, выполнение запро-

сов, индексирование и транзакции. Логика ПО написана на Python 3.7: имеются встроенные возможности для работы с файлами, строками, списками, словарями, функциями и другими структурами. Интерфейс ПО был реализован с помощью фреймворка Tkinter (стандартная библиотека для создания графического пользовательского интерфейса (GUI)).

Обеспечено обучение нейромодели на вкладке «Тренировка НС» (рис. 12). В поле «Количество эпох» выполнено введение их числа (в целых натуральных числах), а в поле «Тест выборка (%)» – процента для тестовой выборки при обучении, как правило 20 %.

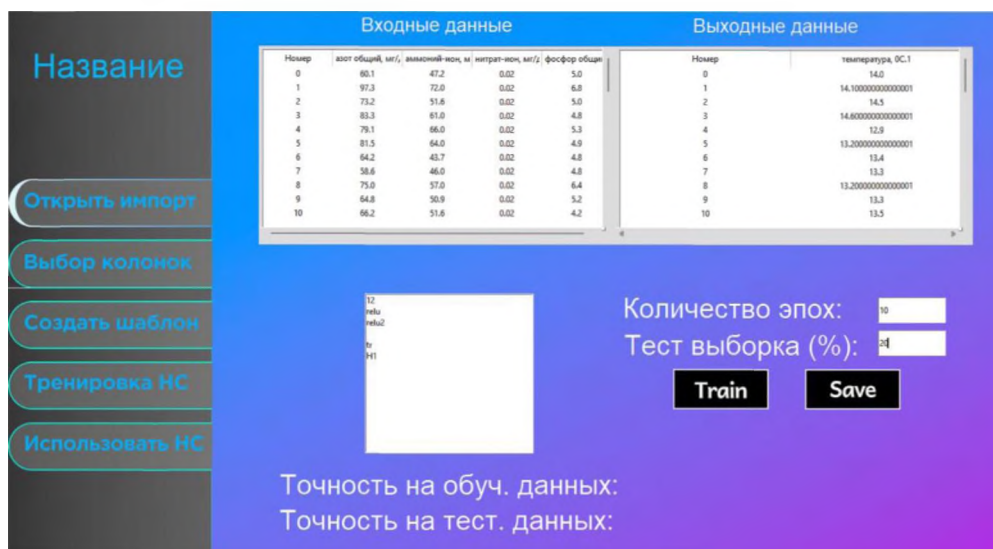


Рис. 12. Интерфейс вкладки «Тренировка НС» программного нейросетевого модуля

Программный нейросетевой модуль оценки параметров очистки СВ является продуктовым решением поддержки принятия решений и может дополнять базовое ПО цифровизации ВКХ. С его использованием и на основе описанных подходов на КУПП «Водоканал» г. Барановичи была выполнена апробация методики цифровизации систем водоотведения с учетом критерия экологической эффективности очистных сооружений. Результатами практического использования проведенных исследований стали:

повышение качества экспертной оценки показателей водоотведения и адекватности принятия управленческих решений;

обоснованное определение предприятий-абонентов сети водоотведения, которые оказывают наибольшее негативное воздействие на работу очистных сооружений;

формирование статистической и методической базы для перспективного построения единой математической модели (цифрового двойника) сети водоотведе-

ния исходя из экологической эффективности функционирования очистных сооружений;

улучшение качества создания технических заданий на модернизацию и реконструкцию элементов сети водоотведения, включая очистные сооружения.

При этом промышленное применение цифровых двойников в рамках объектов водопроводно-канализационных хозяйств обосновано реализовывать на базе работающих на предприятиях АСУТП и/или SCADA, с подключением к ним лабораторных информационно-моделирующих систем, и дальнейшей трансформацией до автоматизированных систем управления технологическими процессами (интегрируя физико-математические модели, например, класса виртуальных рабочих мер) и общепроизводственных цифровых моделей с внедрением информационно-аналитических платформ.

Заключение. Созданные методика и программное обеспечение цифровизации водоотведения могут обеспечить следующие основные результаты для организаций ВКХ Республики Беларусь:

повысить ресурсо- и энергоэффективность технологических процессов водоотведения и очистки сточных вод при экономии человеко-часов;

улучшить экологическую безопасность системы водоотведения, включая оптимизацию функционирования очистных сооружений;

обеспечить качество планирования технологических операций и выполнения работ по ТОиР агрегатов, оборудования и других составляющих элементов системы водоотведения;

спрогнозировать оперативное (упреждающее) реагирование на потенциальные чрезвычайные ситуации техногенного характера и предотвращение их возникновения на объектах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Ф23У-012).

Литература

1. Рожко В. Н. // Наука и технологии – ЖКХ. 2019. № 1. С. 48–55.
2. Прошин А. И., Бодырев А. В. // Сантехника. 2020. № 1. С. 28–31.
3. Автоматизированные системы диспетчерского управления комплексами водоочистки и водоснабжения // Информатизация и системы управления в промышленности. 2013. № 2 (44). С. 9–13.
4. Исаков Ю. А. // Modern Science. 2018. N 6–1. P. 25–27.
5. Джонс М. Т. Программирование искусственного интеллекта в приложениях. М.: ДМК Пресс, 2018. – 311 с.
6. Головкин В. А. Нейроинтеллект: теория и применение: в 2 кн. Кн. 1: Организация и обучение нейронных сетей с прямыми и обратными связями. Брест: БПИ, 1999. – 260 с.
7. Alekseevsky D. G., Chernysh Ye. Yu., Shtepa V. N. // Journal of Engineering Sciences. 2021. Vol. 8, N 2. P. H1–H7.
8. Штена В. Н. // Информатика и кибернетика. 2023. № 3 (33). С. 35–42.
9. Штена В. Н. и др. // Искусственный интеллект в Беларуси, Минск, 12–13 окт. 2023 г. Минск: ОИПН НАН Беларуси, 2023. С. 251–256.

10. *Шмена В. Н.* и др. // Инновационные технологии защиты от чрезвычайных ситуаций, Минск, 28 сент. 2023 г. Минск: УГЗ, 2023. С. 20–21.
11. *Shtepa V., Junakova N., Zaiets N.* et al. // *Water*. 2024. Vol. 16, Iss. 23. P. 3483.
12. *Шмена В. Н.* и др. // Интеллектуальные информационные системы: теория и практика. Курск: Курский гос. ун-т, 2023. С. 166–173.
13. *Шмена В. Н.* и др. // Вестник Брестского государственного технического университета. 2024. № 1 (133). С. 149–155.

I. V. VOITOV, V. N. SHTEPA, A. V. KOZYR, A. B. SHIKUNETS

METHODOLOGY AND SOFTWARE FOR DIGITALIZATION OF THE WATER DISPOSAL SYSTEMS OF THE WATER AND SEWAGE FACILITIES

Summary

The key drawback similar solutions in the field of wastewater management in populated areas is the lack comprehensive and operational approach in the context of “monitoring the environmental situation – storing and analyzing data – making decisions in real time on the environmental efficiency wastewater disposal” and the actual absence of the last element in such the chain, which creates an environmental hazard for water bodies. Already at the stage of the primary mathematical processing of the data collected by the information system developed and implemented in the water supply and sanitation sector (WSSS), it was possible to determine approaches to identifying the “images” of key wastewater polluting objects, the waste which poses the significant environmental hazard to the environment, since it causes the death of activated sludge (AS) of the municipal wastewater treatment plants (MWWTP). Evaluation the results physical modeling of the wastewater disposal processes made it possible to identify that when digitalizing WSSS facilities, it is necessary to focus on the preventive elimination of the potential (actual) negative impact on the AS of the MWWTP of the wastewater from individual subscriber enterprises. The methodology for digitalizing wastewater disposal systems based on the criterion environmental efficiency of treatment, substantiated on such conclusions and created, became the theoretical basis for the development and implementation information and analytical software that performs local tasks: intelligent monitoring and forecasting, decision-making support in regulating technological processes. The functioning product solutions is implemented using mathematical approaches of the artificial intelligence: neural networks and casual modeling.