

Рациональные подходы к внедрению цифровых двойников в водопроводно-канализационные хозяйства

В. Н. Штепа

д.т.н, доцент, Белорусский государственный технологический университет,
shtepa@belstu.by, OrcID: 0000-0002-2796-3144, SPIN-код: 2834-2138

Аннотация

Проанализированы основные недостатки функционирования существующих систем автоматизации водопроводно-канализационных хозяйств. Определено одним из наиболее перспективных направлений повышения эффективности соответствующих технологических процессов использование цифрового моделирования (концепты цифровых двойников). С учётом значительной стоимости создания таких продуктовых решений обоснованы и предложены концептуальные схемы их практического внедрения в рамках уже работающих SCADA и АСУТП с дополнением ресурсными базами знаний, лабораторными информационно-моделирующими системами и виртуальными физико-математическими моделями.

Введение

На данный момент в мировой практике существуют технико-технологические проблемы, затрудняющие осуществление эффективного управления и мониторинга водопроводно-канализационных хозяйств (ВКХ), как населённых пунктов, так и промышленных предприятий [1-5]. Они включают в себя следующие составляющие:

- отсутствие измерительных средств, работающих в сегментах сетей, прежде всего водоотведения, способных в оперативном режиме (приблизённо к реальному времени) и удалённо передавать данные о качестве водных растворов, выдерживать агрессивную среду, а также быть энергонезависимыми, то есть функционировать без подключения к источнику электрического питания;
- отсутствие программного обеспечения, способного оценивать и прогнозировать качество водных растворов в сегментах сети её транспортировки;
- единицы продуктовых решений способных адаптивно управлять сооружениями очистки и водоподготовки, адекватно рассчитывать варианты действий технологов при залповых поступлениях ксенобионтов, а также прогнозировать экологическое состояние природных водных ресурсов, в том числе после их очистки [6].

При этом комплексным недостатком, который снижает эффективность функционирования современных ИТ-продуктов автоматизации водопроводно-канализационных хозяйств, является отсутствие единой информационной среды, которая бы позволила оптимизировать деятельность технических средств и кадровых ресурсов для гарантированного достижения нормативных требований к качеству водоснабжения и водоотведения при минимизации материальных и

других затрат [7]. Соответственно, обоснование информационно-моделирующего и управляющего программного обеспечения, нацеленного на преодоление составляющих такой научно-практической проблематики, можно характеризовать актуальной задачей.

Анализ существующих решений и требований к внедрению цифровых двойников

Один из современных подходов, с помощью которого достигается значительное повышение уровня автоматизации, что можно использовать и в ВКХ – цифровизация технологических процессов с синтезом цифровых двойников (ЦД) [8]. Перспективность внедрения последних продиктована тем, что область цифрового моделирования растёт быстрыми темпами. Так согласно анализа агентства MarketsandMarkets, в 2023 году объём рынка ЦД превысил \$10 млрд.; прогнозируется его увеличение в среднем на 61,3% в год и через 5 лет ожидается порядка \$100 млрд.

Нормативная база, обеспечивающая их внедрение [9]:

- ГОСТ Р – создан на семействе стандартов СССР и функционирует в СНГ;
- Международный стандарт ISO (International Organization for Standardization) – создан по инициативе Международной организации по стандартизации, на данный момент к нему присоединилось свыше 170 участников.

При этом мировой стандарт более детально проработан и адаптирован к практическому использованию [10]. В ISO 23247 «Automation systems and integration – Digital twin framework for manufacturing» ЦД определяется «цифровой моделью конкретного физического элемента или процесса с

подключениями к данным, которая обеспечивает конвергенцию между физическим и виртуальным состояниями с соответствующей скоростью синхронизации». В практическом контексте внедрение на объектах таких виртуальных моделей требует очень значительных финансово-материальных затрат для формирования информационной инфраструктуры и специализированное программное обеспечение (ПО) [8]. Таким образом необходимо создавать концептуальные модели ЦД, где бы минимизировались новые вложения, при этом использовался уже работающий информационный базис – выполнялось «неразрушающее внедрение»:

1. Сохранение работоспособности существующих систем;
2. Объединение разнотипных технических платформ;
3. Множественное подключение и одновременное использование;
4. Загрузка базы объектов работающих хранилищ данных;
5. Быстрое разворачивание системы;
6. Невысокие финансовые, временные и кадровые вложения.

При этом важно реализовать полную и достаточную управленческую иерархию [11] (рис. 1).

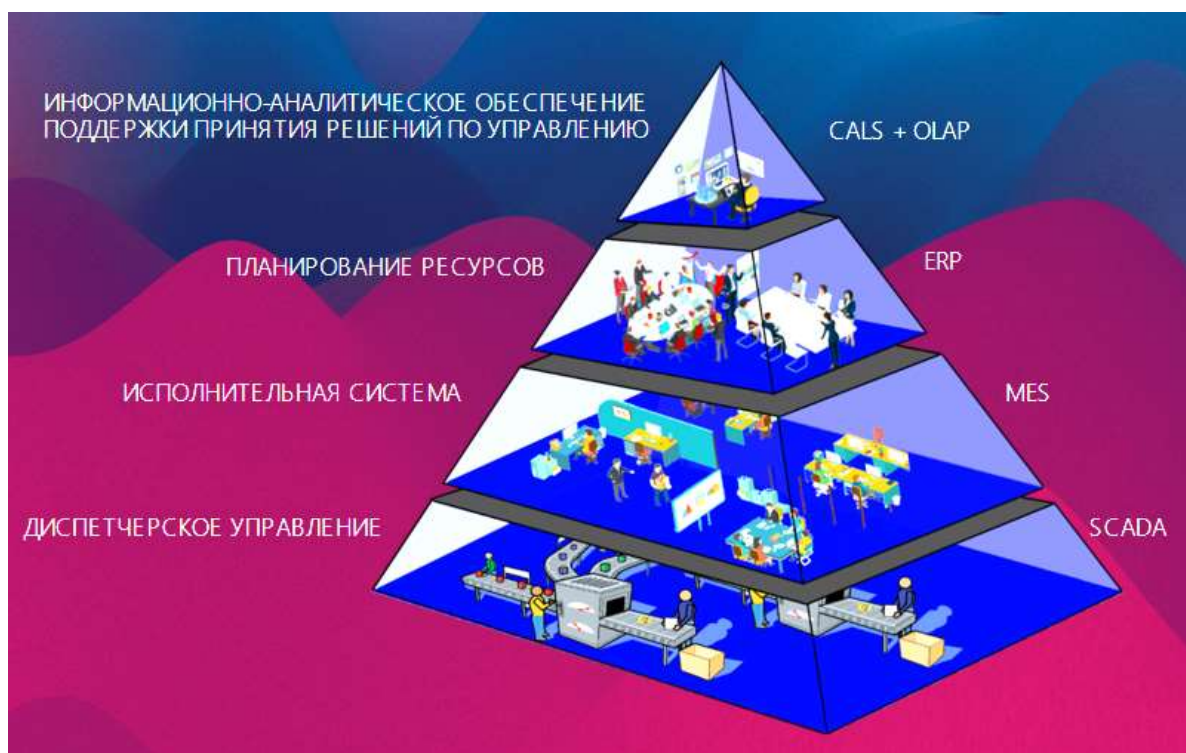


Рисунок 1 – Иерархическая архитектура построения информационно-управляющих систем промышленно-коммунальными объектами (SCADA (supervisory control and data acquisition) – диспетчерское управление; MES (Manufacturing Execution Systems) – производственное исполнение (или система управления технологией); ERP (Enterprise Resources Planning) – планирование ресурсов предприятия, обеспечивает финансово-хозяйственную деятельность, планирование и учет производства; OLAP (Online Analytical Processing) – аналитическая обработка информации в реальном времени; CALS-технологии (Continuous Acquisition and Life cycle Support) – информационные технологии, используемые в управлении процессами жизненного цикла изделия или системы)

Концептуальные схемы создания цифровых двойников ВКХ на основе SCADA, лабораторных информационно-моделирующих систем и автоматизированных систем управления технологическими процессами

Один из вариантов концептуальной схемы развёртывания ЦД на базе функционирующей на ВКХ SCADA представлен на рисунке 2, куда для дополнения измерительного информационного поля

интегрирована лабораторная информационно-моделирующая система (ЛИМС).

В рамках такого решения SCADA выполняет типовые для себя задачи обеспечения работ в реальном времени по сбору, обработке, отображению и архивированию информации об объекте или управление им. На данный момент диспетчерское управление является основным методом автоматизации ВКХ. При этом программное обеспечение устанавливается на компьютеры и контроллеры и, для связи с объектом, использует драйверы ввода-вывода и/или OPC/DDE серверы.

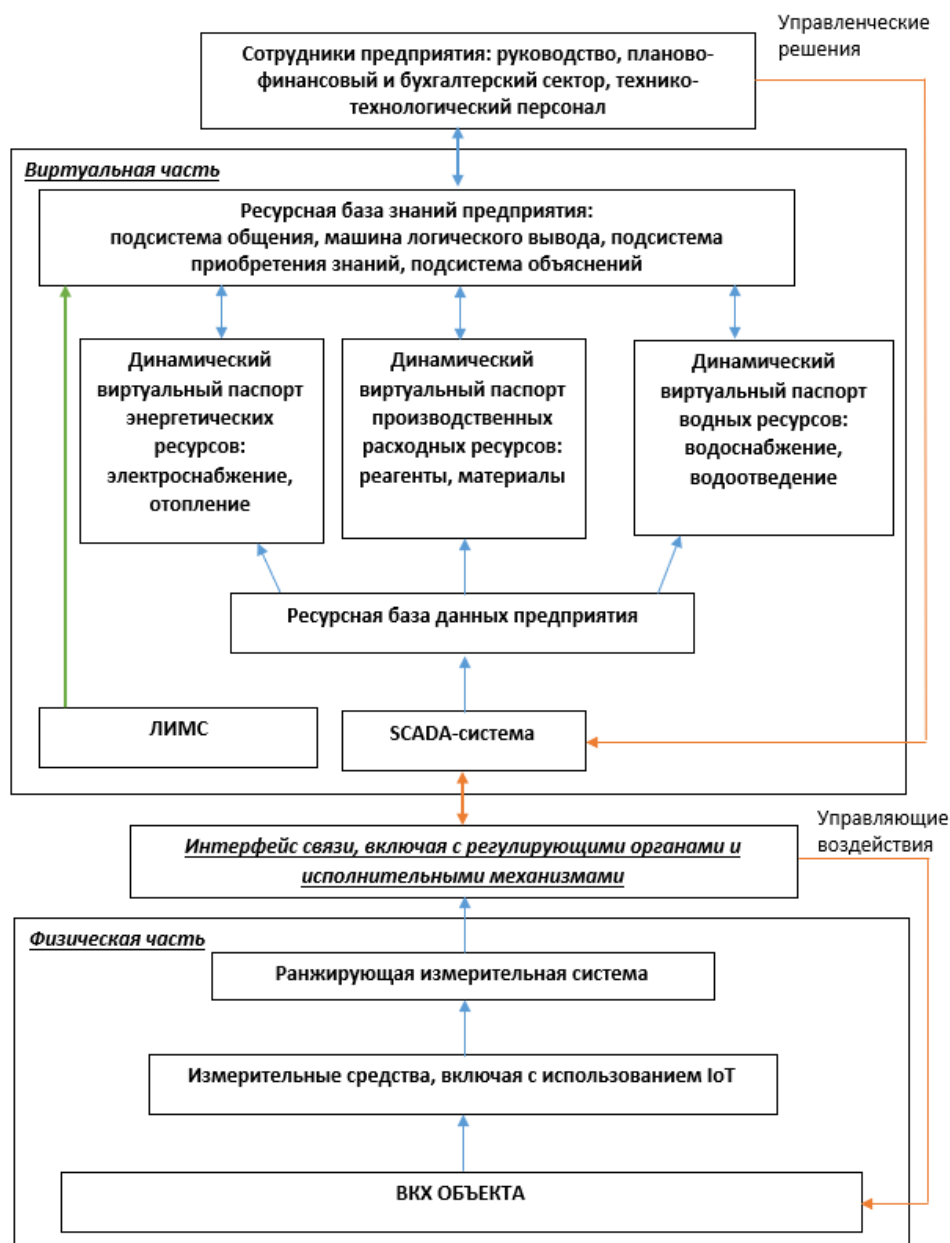


Рисунок 2 – Концептуальная схема создания цифрового двойника водопроводно-канализационного хозяйств с использованием функционирующей SCADA и интеграцией ЛИМС

Предлагаемая схема (см. рис. 2) позволяет поэтапно создавать функциональные и востребованные специалистами предприятий продуктовые решения, которые пошагово трансформируются в ЦД:

1. Настройка над SCADA ресурсной базы данных (визуализация информации) – с интеграцией информационных потоков от разрозненных SCADA в единый информационно-технологический канал;

2. Формирование на основе ресурсной базы данных динамических виртуальных паспортов технологических процессов (энергетического, производственно расходного, водного) [12] и обеспечение единой аналитической обработки ранее децентрализованной информации;

3. Преобразование виртуальных паспортов в ресурсную базу знаний;

4. Принятие управленческих решений на основе взаимодействия с ресурсной базой знаний и их выполнение через инфраструктуру и функционал SCADA.

Для увеличения полноты базы данных (базы знаний) в лабораториях ВКХ необходимо создать специализированные ЛИМС – это технология, предназначенная для получения достоверной информации по результатам испытаний (исследований) и оптимизации управления этой информацией с целью ее использования для принятия корректных своевременных управленческих решений.

Другим ИТ-продуктом, который улучшит качество передаваемой в базу данных (базу знаний) технологических параметров и уменьшит «шумовую» составляющую, выступит ранжирующая

измерительная система. Для неё результат измерения величины попадает в одну из категорий и число таких категорий конечно [10]. Можно выделить два основных типа ранжирующих измерительных систем: системы, в которых измерения проводит человек (контролер) при помощи своих органов чувств; и автоматические системы, в которых задачу ранжирования осуществляет электронный прибор (в

нашем случае программируемый контроллер) – они могут работать без участия человека-контролера.

Поскольку SCADA по своему базовому предназначению изначально является частью автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП), то обосновано её функционально расширить до последней (рис. 3), если она уже не используется.

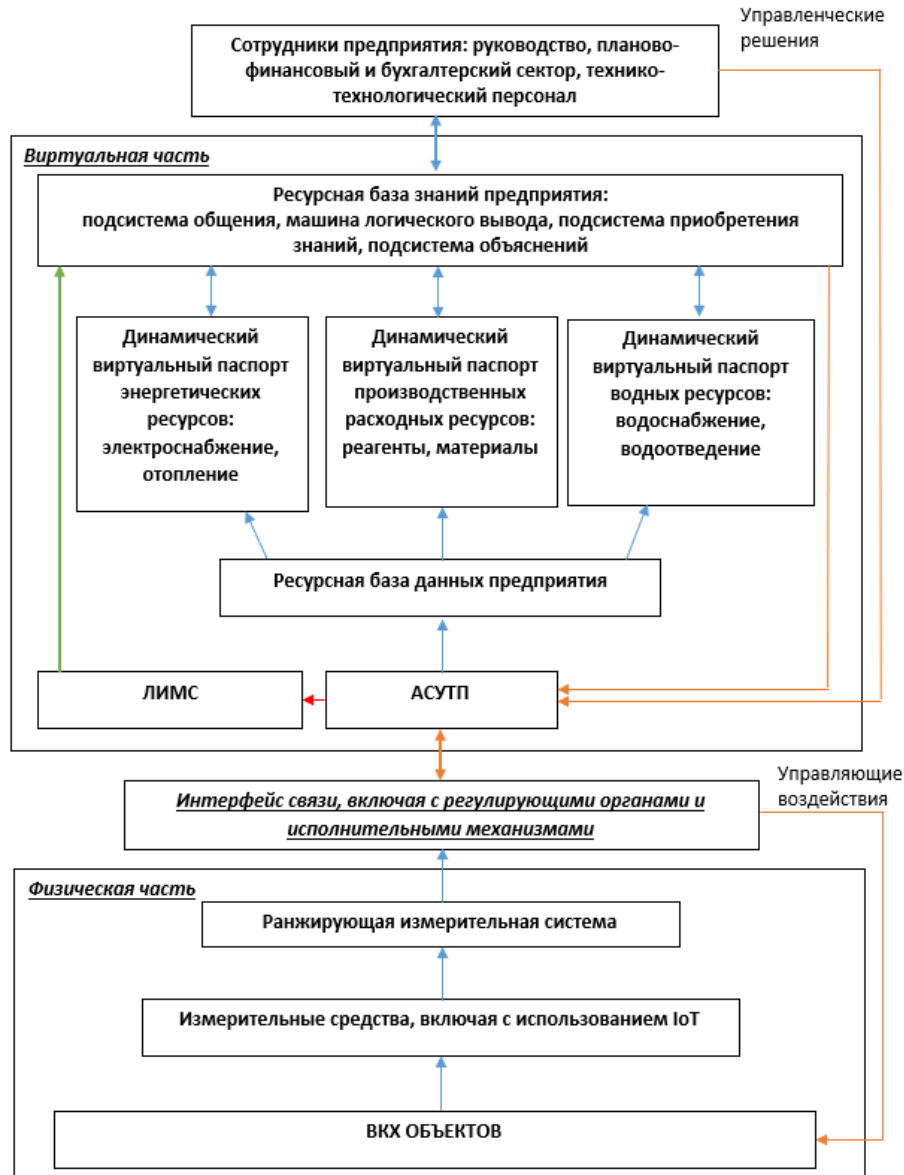


Рисунок 3 – Концептуальная схема создания цифрового двойника водопроводно-канализационного хозяйства с использованием АСУТП и интеграцией ЛИМС

Таким образом (см. рис. 3) будет реализовано построение автоматизированной системы управления (а не только диспетчеризации), которая соответствует иерархии рисунка 1. Внедрение вместо SCADA АСУТП позволит решить намного больший спектр задач на объектах ВКХ:

- Автоматизация процессов с максимально допустимой производительностью;

- Управление с учетом плана и задач путем оперативной перенастройки параметров технологического оборудования;

- Реализация статистического управления в реальном времени, например, за экстремальными и адаптивными алгоритмами;

- Оптимизация технологических процессов в режиме реального времени.

Концептуальная схема создания цифровых двойников ВКХ с использованием физико-математических моделей и их интеграцией с АСУТП

С учётом того, что на данный момент имеет место критическая недостаточность измерительных средств качества водных растворов способных работать в режиме реального времени в промышленных условиях ВКХ (согласно авторской экспертной оценки недостаточность номенклатуры такого измерительного оборудования – около 70-75%); также значительно не хватает аккредитованных лабораторий – возникают очень значительные опасности как для потребителей водных ресурсов (населённые пункты, предприятия), так и для геоэкосистем, в которые сбрасываются сточные воды, особенно в условиях потенциального

возникновения чрезвычайных ситуаций антропогенного и/или природного происхождения [13]. Тогда для он-лайн оценки эколого-энергетической эффективности параметров водоснабжения и/или водоотведения (включая очистные сооружения и станции водоподготовки) целесообразно использовать автоматизированные компьютерно-интегрированные физико-математические модели технологических процессов с включением их в АСУТП и локализацией непосредственно на объектах ВКХ (рис. 4). Для таких целей разработано и апробировано методическое обеспечение проектирования физической модели (ФМ) водообработки, в данном случае на примере очистки сточных вод (рис. 5), как составляющей развития (усовершенствования) информационно-измерительных систем в двух аспектах: структурном и функциональном [14].

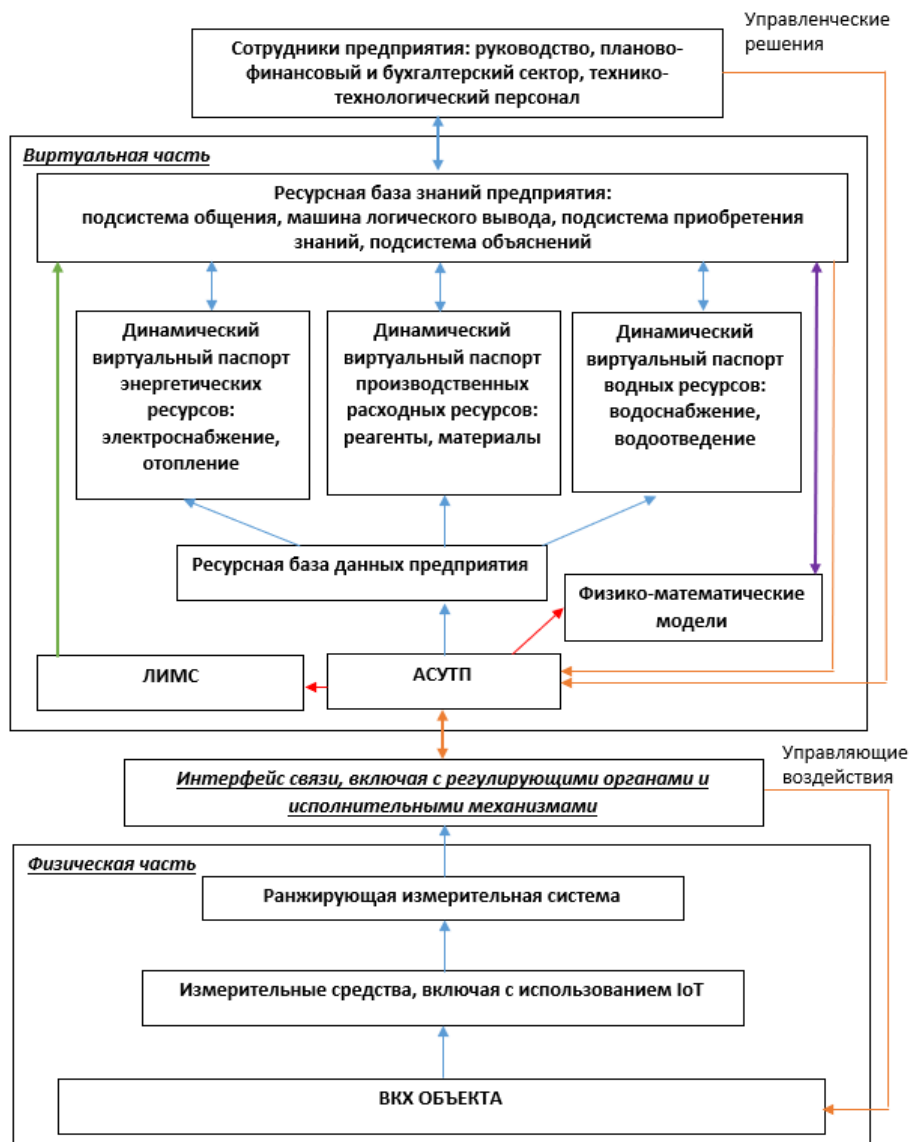


Рисунок 4 – Концептуальная схема создания цифрового двойника водопроводно-канализационного хозяйства с использованием функционирующей АСУТП интеграцией ЛИМС и автоматизированных физико-математических

моделей



Рисунок 5 – Схема использования виртуальной физико-математической модели при поддержке управления очисткой сточных вод

Расширив функциональные возможности ФМ и дополнив ее программной реализацией методического обеспечения, которое реализует воспроизведения и/или сохранение показателей водных растворов на этапах проектирования и при эксплуатации в режиме реального времени, аргументировано виртуальную меру энергоэффективности водоочистки (см. рис. 5) использовать в цифровом двойнике ВКХ (см. рис. 4).

Заключение

Промышленное применение цифровых двойников в рамках объектов ВКХ обосновано реализовывать на базе работающих на предприятиях SCADA, с подключением к ним ЛИМС, и дальнейшей трансформацией до АСУТП (интегрирую физико-математические модели, например, класса виртуальных рабочих мер) и общепроизводственных цифровых моделей с внедрением информационно-аналитических платформ.

Такой подход при рационализации материально-финансовых затрат и гибкости переобучения персонала позволит поддерживать: эффективное управление объектами водоснабжения и водоотведения, включая оценку качества сточных вод; повышать ресурсо- и энергоэффективность технологических процессов; обеспечивать экологическую безопасность систем водоснабжения и водоотведения, включая оптимизацию функционирования очистных сооружений; более качественно планировать операции и выполнять работ по техническому обслуживанию и ремонту; оценку рисков и раннее предупреждение потенциальных чрезвычайных ситуаций техногенного характера и недопущение их возникновения, например, в случае попадания опасных токсикантов на биологические очистные сооружения; адекватное формирование технических заданий на строительство, реконструкцию или модернизацию.

Дальнейшие исследования целесообразно нацелить на построение методологии синтеза цифровых платформ организаций ВКХ, как сложных многопараметрических объектов с биотехнологическими подсистемами.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (договор № Ф23У-012 от 02.05.2023 года).

Литература

1. Архипов Д.Э., Едемский К.Е., Кожевникова С.И., Дмитриев В.В. Развитие мониторинга водных объектов на основе интегральной оценки экологического статуса и моделирования экологических функций // *European Journal of Natural History*. – 2022. – № 2. – С. 31-37
2. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Official Journal L 327*, 22/12/2000, 73 p.
3. Eugenio Molina-Navarro, Pedro Segurado, Paulo Branco, Carina Almeida, Hans E. Andersen Predicting the ecological status of rivers and streams under different climatic and socioeconomic scenarios using Bayesian Belief Networks. *Limnologia* 80 (2020) 125742 <https://doi.org/10.1016/j.limno.2019.125742>.
4. Hering, D., Carvalho, L., Argillier, C., Beklioglu, M., Borja, A., Cardoso, A.C., et al., 2015. Managing aquatic ecosystems and water resources under multiple stress — an introduction to the MARS project. *Sci. Total Environ.* 503–504, pp. 10–21.
5. Алексеев, Е. В. Основы моделирования систем водоснабжения и водоотведения : учебное пособие / Е. В. Алексеев, В. Б. Викулина, П. Д. Викулин - Москва : Издательство МИСИ - МГСУ, 2017. - 126 с. - ISBN 978-5-7264-1641-0. - Текст: электронный // ЭБС Консультант студента: [сайт]. - URL:<https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785726416410.html> (дата обращения: 23.09.2022).

6. Штепа, В. Н. Концептуальные основы энергоэффективной системы управления комбинированными системами водоочистки / В. Н. Штепа // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика: научно-технический журнал. – 2016. – № 5. – С. 479 – 487.

7. Штепа, В.Н. Интеллектуальная система анализа и прогноза экологической безопасности биологических сооружений очистки сточных вод / В.Н. Штепа, Н.Ю. Золотых // Первая выставка-форум IT-академграда «Искусственный интеллект в Беларуси»: сборник докладов, Минск, 13-14 октября 2022 г. / Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси. - Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2022. - С. 41-45.

8. Обоснование структуры и состава систем водоочистки на основе оценки уровня автоматизации технологических процессов / В.Н. Штепа [и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. - 2020. - № 4. - С. 17-22.

9. Штепа, В.Н. Структура и функционал интеллектуальной системы поддержки принятия решений в водоотведении / В.Н. Штепа // Информатика и кибернетика: научный журнал. - 2022. - №3 (29). - С.51-57.

10. Штепа, В.Н. Обоснование и схемы использования ранжирующих измерительных систем экологического мониторинга и интеллектуального анализа режимов водоотведения / В.Н. Штепа, Н.Ю. Золотых, С.Ю. Киреев // Вестник Полоцкого

государственного университета. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки: научный журнал. - 2023. - № 1. - С. 94-103.

11. В.В. Бураков, Н.Г. Мустафин, М.Ю. Охтилев, Б.В. Соколов. Методология и технологии решения задач проактивного мониторинга и управления сложными техническими объектами // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий: материалы V межрегиональной научно-практической конф. Севастополь, 24-28 сентября 2019 г. / Севастопольский государственный университет; науч. ред. Б..В. Соколов. – Севастополь: СевГУ, 2019. С.112–114.

12. Штепа, В.Н. Функционально-статический анализ системы контроля водоотведения и оценка подходов к её цифровому моделированию / В.Н. Штепа // Информатика и кибернетика: научный журнал. – 2023. – № 3 (33). – С. 35-42.

13. Войтов И. В., Штепа В. Н., Смелов В. В., Карпович Д. С. Оценка степени автоматизации и внедрения цифровых платформ управления системами водоотведения // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2024. № 2 (284). С. 43–52

14. Иванов С.А., Никольская К.Ю., Радченко Г.И., Соколинский Л.Б., Цымблер М.Л. Концепция построения цифрового двойника города // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2020. Т. 9, № 4. С. 5–23. DOI: 10.14529/cmse200401.

Штепа В.Н. Рациональные подходы к внедрению цифровых двойников в водопроводно-канализационные хозяйства. Проанализированы основные недостатки функционирования существующих систем автоматизации водопроводно-канализационных хозяйств. Определено одним из наиболее перспективных направлений повышения эффективности соответствующих технологических процессов использование цифрового моделирования (концепты цифровых двойников). С учётом значительной стоимости создания таких продуктовых решений обоснованы и предложены концептуальные схемы их практического внедрения в рамках уже работающих SCADA и АСУТП с дополнением ресурсными базами знаний, лабораторными информационно-моделирующими системами и виртуальными физико-математическими моделями.

Ключевые слова: водоотведение, водоснабжение, водопроводно-канализационные хозяйства, управление, цифровое моделирование, цифровой двойник.

Shtepa V.N. Rational approaches to the implementation digital twins in water supply and sewerage systems. The main shortcomings existing automation systems for water supply and sewerage facilities are analyzed. One of the most promising results increasing the efficiency technological processes using conceptual analysis (the concept of digital twins) is determined. Taking into account the cost of creating products such solutions, conceptual schemes for their practical application within the framework of the already industrial SCADA and automated process control systems with additions resource knowledge bases, laboratory information-modeling mechanisms and virtual physical and mathematical ones are substantiated and proposed.

Keywords: water disposal, water supply, water supply and sewerage, management, digital modeling, digital twin.

Статья поступила в редакцию 10.10.2024
Рекомендована к публикации профессором Мальчевой Р. В.