

ИНФОРМАТИКА И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ COMPUTER SCIENCE AND ENGINEERING SCIENCES

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ MODELLING OF PROCESSES AND MANAGEMENT IN TECHNICAL SYSTEMS

УДК 628.3:621.3

**И. В. Войтов, В. Н. Штепа, В. В. Смелов,
Д. С. Карпович**

Белорусский государственный технологический университет

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ АВТОМАТИЗАЦИИ И ВНЕДРЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ПЛАТФОРМ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМАМИ ВОДООТВЕДЕНИЯ

В статье обоснована актуальность использования цифровых решений при строительстве (модернизации, реконструкции) водопроводно-канализационных хозяйств Республики Беларусь на основе технологий интернета вещей, включающих виртуальное представление реальных объектов, аппаратно-программных моделирующих решений с использованием искусственного интеллекта, систем распределенной и удаленной передачи информации.

Функциональное моделирование с учетом многофакторности и нелинейности колебания параметров объектов управления продемонстрировало необходимость увеличения уровня автоматизации технологических процессов с целью координации действий различных установок и повышения их эффективности, особенно при рисках техногенных чрезвычайных ситуаций.

В результате расчета и анализа степени автоматизации водоотведения была обоснована актуальность создания цифровой платформы управления водоотведением, в котором объектом может выступать как вся система, так и отдельные элементы систем водоотведения.

Сформулированы планируемые результаты функционирования такой платформы, среди которых основными являются: соблюдение нормативов государственных социальных стандартов по обслуживанию населения в области ВКХ при обеспечении экологической безопасности функционирования систем водоотведения и систем очистки сточных вод, повышение экономичности их функционирования на различных этапах жизненных циклов и выполнение требований экологии.

Ключевые слова: водопроводно-канализационное хозяйство, водоотведение, автоматизация, цифровое моделирование.

Для цитирования: 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.

DOI: 10.52065/2520-6141-2024-284-7.

I. V. Voitau, V. N. Shtepa, V. V. Smelov,
D. S. Karpovich
Belarusian State Technological University

ASSESSMENT OF THE DEGREE OF AUTOMATION AND IMPLEMENTATION OF DIGITAL PLATFORMS FOR MANAGING WASTEWATER TRANSPORTATION SYSTEMS

The article substantiates the relevance using digital solutions in the construction (modernization, reconstruction) water supply and sewerage facilities of the Republic of Belarus based on Internet of Things technologies, including virtual representations real objects, hardware and software modeling solutions using artificial intelligence, distributed and remote information transmission systems.

Functional modeling taking into account the multifactorial and nonlinear nature parameter fluctuations demonstrated the need to increase the level of automation technological processes in order to coordinate the actions various installations and increase their efficiency, especially in case of risks man-made emergency situations.

Calculation and analysis of the degree automation wastewater disposal, existing and necessary, substantiated the relevance creating methodological and information and communication support for a digital platform for managing wastewater disposal.

The planned results of the functioning such platform are formulated, among which the main ones are: compliance with state social standards for serving the population in the field of water and wastewater services while ensuring the environmental safety of the functioning water disposal systems and wastewater treatment systems, increasing the efficiency their functioning at various stages life cycles and compliance with environmental safety requirements.

Keywords: water supply and sewerage, water disposal, automation, digital modeling.

For citation: Voitau I. V., Shtepa V. N., Smelov V. V., Karpovich D. S. Assessment of the degree of automation and implementation of digital platforms for managing wastewater transportation systems. *Proceedings of BSTU, issue 3, Physics and Mathematic. Informatics*, 2024, no. 2 (284), pp. 43–52 (In Russian). DOI: 10.52065/2520-6141-2024-284-7.

Введение. Целью Государственной программы «Цифровое развитие Беларуси» на 2021–2025 гг. определено обеспечение внедрения информационно-коммуникационных и передовых производственных технологий в отрасли национальной экономики и сферы жизнедеятельности общества.

В ее рамках выполняются мероприятия по созданию (развитию) современной информационно-коммуникационной инфраструктуры, внедрению цифровых инноваций в отраслях экономики, в том числе технологий «умных городов». Важной технологической частью последней подпрограммы выступает использование программных продуктов для обеспечения комфортной и безопасной экосреды жителей населенных пунктов.

В Беларуси накоплен большой положительный опыт построения, реконструкции и эксплуатации систем водоснабжения и водоотведения [1, 2], позволяющий прояснить общие принципы устройства таких систем: унифицировать перечень применяемого технологического оборудования, определить параметры и методы мониторинга состояния систем и показателей их эффективности, сформулировать организационные структуры и методы управления системами. В современных условиях опыт может быть реализован в форме цифровой платформы – информационной системы, обеспечивающей поддержку деятельности систем водоснабжения и водоот-

ведения. На рис. 1 схематически представлена архитектура цифровой платформы водопроводно-канализационного хозяйства (ВКХ).

Структурно цифровая платформа представляет собой набор систем (на рис. 1 это S_1, S_2, S_3, S_4), взаимодействующих между собой через специализированную систему SYSTEM-BUS. Кроме того, внешние системы OTHER SYSTEMS взаимодействуют с системами платформы тоже с помощью SYSTEM-BUS. Каждая система состоит из одного или нескольких программных модулей (на рис. 1 это $M1.1, M1.2, \dots, M3.2$). Подключенное к платформе технологическое оборудование представлено в системе их цифровыми двойниками (A, B, C), к экземплярам которых может быть подсоединено реальное оборудование ($A1, A2, \dots, C1$). Взаимодействие систем платформы с цифровыми двойниками и внешними пользователями ($U1$) осуществляется через специализированную систему FRONT-BUS.

Функциональность систем платформы разбивается на три уровня (FRONT, MIDDLE, BACK).

Уровень FRONT предназначен для взаимодействия с внешними устройствами и пользователями. Уровень MIDDLE служит для поддержки функций управления, настройки, анализа, оценки рисков и безопасности. Уровень BACK представляет функции учета, сбора статистики, мониторинга состояния.

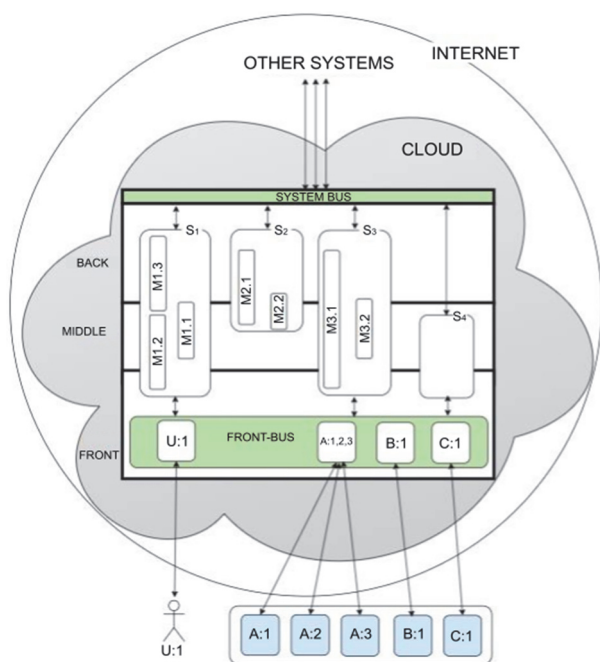


Рис. 1. Архитектура цифровой платформы ВКХ

Предполагается, что цифровая платформа развернута в облачной системе (CLOUD), а коммуникация с системами, модулями, цифровыми двойниками, пользователями и технологическим оборудованием осуществляется в рамках сети Интернет.

Перспективными направлениями в отечественном ВКХ являются технологии IoT (интернета вещей), а также системы виртуального представления реальных объектов, аппаратно-программных моделирующих решений на основе использования искусственного интеллекта, систем распределенной и удаленной передачи информации – фактически, разработки цифровых двойников (цифровых теней) [3–5] технологических узлов и процессов водоотведения коммунальных и промышленных объектов.

Основная часть. Целью исследований является обоснование технологической целесообразности создания и функциональных задач цифровой платформы управления водоотведением коммунально-промышленными объектами.

Обоснование методики исследований. Центральное место в цифровой платформе управления системам водоотведения занимает система контроля экологической безопасности коммунального водоотведения. На стадии создания концептуальной модели этой системы целесообразно применение методологии IDEF0 [6] – приемов функционального моделирования и графической нотации. IDEF0-модель системы выглядит как «черный ящик» со входами, выходами, управлением и механизмом, который постепенно уточняется до необходимого уровня детализации. Описание методологии IDEF0 содержится в рекомендациях Р 50.1.028–2001 «Информационные технологии поддержки жиз-

ненного цикла продукции. Методология функционального моделирования» [7]. Методология применяется при проектировании информационных систем и предназначена для графического описания структуры, функций и выполняющихся в рамках этих систем процессов.

Анализ применяемых в системах коммунального водоотведения технологий [8–10] позволил сформулировать следующие компоненты IDEF0-модели:

- *входящие факторы* (данные поступают от измерительных средств, лабораторного анализа и экспертов): качество сточных вод отдельных абонентов, качество сточных вод на входе в очистные сооружения, расход СВ, состояние оборудования;
- *управляющие факторы*: нормативные требования к абонентам и сбросу в природные водоемы, стоимость ресурсов, паспортные характеристики оборудования;
- *механизмы*: технологическое оборудование (например, насосы, задвижки, контроллеры, воздухоудовки);
- *результаты*: показатели экологической безопасности и ресурсозатратности системы.

Функциональное моделирование систем водоотведения. На рис. 2 приведена контекстная диаграмма системы контроля экологической безопасности водоотведения.

Проведя функциональную декомпозицию (разделение) первого уровня, раскрыв контекстную диаграмму (см. рис. 1), можно получить детализацию процесса экологического контроля системы водоотведения (рис. 2).

Полученные результаты (см. рис. 2 и 3) указывают на иерархичность и многофакторность системы водоотведения, что требует соответствующих подходов при ее управлении. Также с учетом нестационарности и нелинейности колебания параметров [11] можно рассматривать компьютерно-интегрированную систему как эффективное средство согласования работы различных технологических установок и повышение их эффективности, особенно при рисках чрезвычайных ситуаций [12].

Расчет уровня автоматизации водоотведения и анализ путей его повышения. Исходя из того что технологической основой цифровизации процессов является их автоматизация, для оценки фактического состояния внедрения соответствующих средств выполнили оценку уровня автоматизации, где такой показатель P определяется на основе декомпозиции всего действия по управлению на отдельные функции. Для каждой i -й функции задается коэффициент важности γ_i , который выявляет ее значимость в общем процессе, и оценивается степень автоматизации данной функции. Коэффициент γ_i и оценка оптимального значения степени автоматизации $\beta_{\text{опт}}$ определяются с помощью экспертных оценок.



Рис. 2. Контекстная диаграмма системы контроля экологической безопасности водоотведения

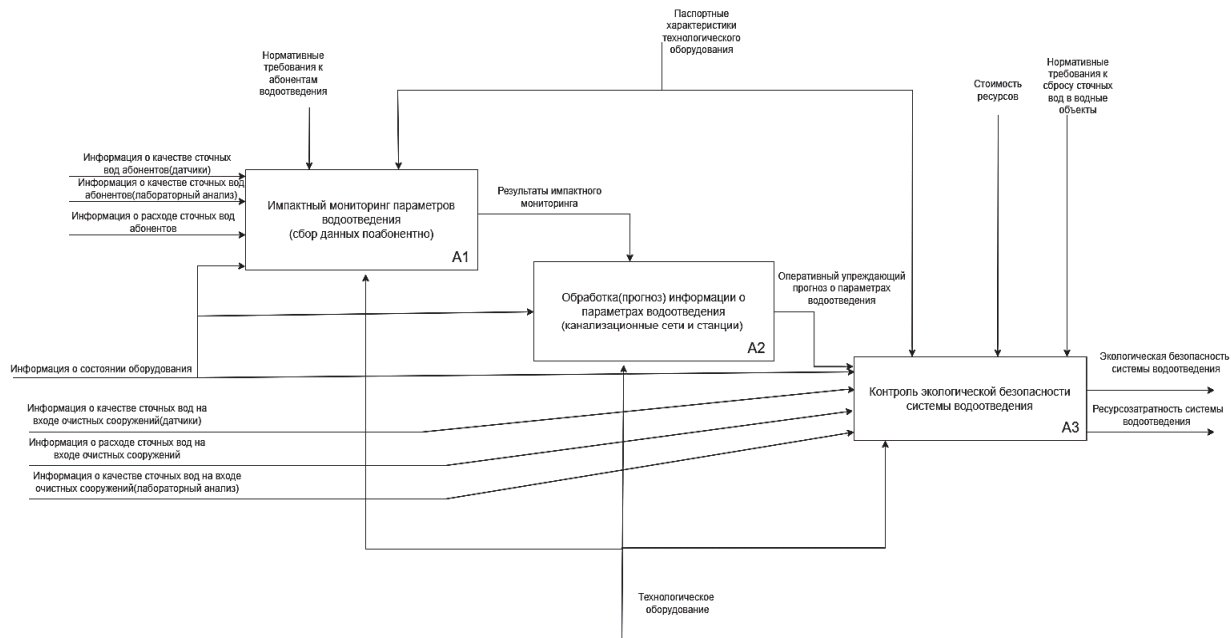


Рис. 3. Диаграмма декомпозиции контекстной диаграммы экологического контроля водоотведения

Параметр P получают на основе декомпозиции всего действия по управлению на отдельные функции и рассчитывают как среднее для всех подфункций, отнесенное к важности степени их автоматизации:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n \beta_i \gamma_i}{\sum_{i=1}^n \gamma_i}, \quad (1)$$

где β_i — оценка степени автоматизации.

Показатель соответствия ρ_i степени автоматизации i -й функции определяется по формуле

$$\rho_i = \frac{\beta_i}{\beta_{i \text{ опт}}} \cdot 100\%. \quad (2)$$

Переход к общему показателю

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i \gamma_i}{\sum_{i=1}^n \gamma_i}. \quad (3)$$

Таким образом, чтобы рассчитать значение показателя P , необходимо иметь следующие данные:

– список функций системы (с использованием методологии IDEF0);

- коэффициенты важности функций γ_i (экспертная оценка);
- оценку степени автоматизированности функций β_i и их оптимальные значения $\beta_{i\text{опт}}$ (согласно паспортным данным и экспертной оценке).

Описанные выше данные целесообразно представить в виде таблицы (табл. 1), в которой перечень функций составляется на базе описания действующей системы автоматизации водоотведения.

Оценим степень автоматизированности процессов-функций (см. рис. 2, табл. 1):

- «Импактный экологический мониторинг параметров водоотведения»;
- «Обработка (прогноз) информации о параметрах водоотведения»;
- «Контроль экологической безопасности системы водоотведения».

Ключевым ограничением автоматизации функции «Импактный экологический мониторинг параметров водоотведения» является критическое отсутствие измерительных средств, способных работать в оперативном режиме (максимально приближенном к режиму реального времени) – не более 30% от технологических потребностей, при этом на основе исследований установлено, что степень наблюдаемости увеличивается путем косвенного анализа инструментально определяемых параметров с использованием подходов математического моделирования [13, 14].

Функция «Обработка (прогноз) информации о параметрах водоотведения» на данный момент фактически не выполняется в автоматическом режиме – такую оценку могут давать только эксперты-технологи; подзадача предиктирования

не решается даже на концептуальном уровне. Процесс «Контроль экологической безопасности системы водоотведения» является наиболее управляемым в результате того, что он локализован на очистных сооружениях (подфункции: «Расчет управляющих воздействий», «Выполнение очистки сточных вод», «Корректировка управляющих воздействий») и его оптимизация выступает задачей специализированных систем управления, как правило, уровня SCADA-решений с дальнейшей передачей информации на автоматизированные системы более высокого уровня иерархии.

Например, для реализации наиболее автоматизированной функции «Контроль экологической безопасности системы водоотведения» значение β_3 определяется следующим образом:

$$\beta_3 = \sum_{\gamma=1}^3 \frac{\beta_{3\gamma} n_{3\gamma}}{n_{33}} = 0,26. \quad (4)$$

Тогда согласно формуле (2)

$$\rho_3 = \frac{\beta_3}{\beta_{3\text{опт}}} \cdot 100\% = 43\%. \quad (5)$$

Аналогично рассчитываем для других функций действующей и планируемой цифровизированной систем водоотведения остальные параметры уровня автоматизации (табл. 2).

Расчет фактического уровня автоматизации:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^3 \beta_i \gamma_i}{\sum_{i=1}^3 \gamma_i} = \frac{1 \cdot 0,3 + 0,9 \cdot 0,1 + 1 \cdot 0,43}{1 + 0,9 + 1} = 0,28. \quad (6)$$

Таблица 1

Исходные данные для расчета потребности автоматизации коммунального водоотведения

Функция	γ_i	Количество подфункций	Формула для расчета	$\beta_{i\text{опт}}$
Импактный экологический мониторинг параметров водоотведения	1	1	$\beta_1 = \frac{n_{1\gamma}}{n_{13}},$ где $n_{13}, n_{1\gamma}$ – общее и автоматически измеряемое γ -м способом количество параметров	0,5
Обработка (прогноз) информации о параметрах водоотведения	0,9	1	$\beta_2 = \sum_{\gamma=1}^2 \frac{\beta_{2\gamma} n_{2\gamma}}{n_{23}},$ где $n_{23}, n_{2\gamma}$ – общее и автоматически измеряемое γ -м способом количество параметров	0,8
Контроль экологической безопасности системы водоотведения	1	3	$\beta_3 = \sum_{\gamma=1}^3 \frac{\beta_{3\gamma} n_{3\gamma}}{n_{33}},$ где $n_{33}, n_{3\gamma}$ – общее и автоматически измеряемое γ -м способом количество параметров	0,6

Расчет планируемого уровня автоматизации:

$$P_{\text{пл}} = \frac{\sum_{i=1}^3 \beta_i \gamma_i}{\sum_{i=1}^3 \gamma_i} = \frac{1 \cdot 0,5 + 0,9 \cdot 0,8 + 1 \cdot 0,6}{1 + 0,9 + 1} = 0,63. (7)$$

Тогда в процентном выражении разница между расчетным планируемым (желаемым) уровнем автоматизации и расчетным фактическим составляет: $63 - 28 = 35\%$. Соответственно, необходимо как минимум в 2,25 раза улучшить данный интегральный показатель управляемости системы водоотведения.

Таблица 2

Уровни автоматизации действующей и цифровизируемой системы водоотведения

Реализация функций	Объем реализации функции, %	γ_i	β_i	$\beta_{i \text{ опт}}$	ρ_i
Импактный экологический мониторинг параметров водоотведения: – общее количество измеряемых	100	1,0	0,3	0,5	30
– количество измеряемых вручную	70	1,0	0,3	0,5	30
После цифровизации	100	1	0,5	0,5	50
Обработка (прогноз) информации о параметрах водоотведения	10	0,9	0,1	0,8	10
После цифровизации	80	0,9	0,8	0,8	80
Контроль экологической безопасности системы водоотведения: – приборы по месту	40	1	0,43	0,6	43
– централизованный контроль	30	1	0,43	0,6	43
– с сигнализацией отклонений	30	1	0,43	0,6	43
После цифровизации	100	1	0,6	0,6	60

Анализ табл. 1 и 2, функций (6) и (7) позволяет сделать вывод, что для повышения системного уровня автоматизации до планируемого наибольшее внимание действительно необходимо уделить этапу «Импактный экологический мониторинг параметров водоотведения». Вторым по значимости увеличения значения фор-

мулы (6) до уровня (7) является «Обработка (прогноз) информации о параметрах водоотведения»; на третьем месте стоит «Контроль экологической безопасности системы водоотведения».

В то же время «Импактный экологический мониторинг параметров водоотведения» требует разработки значительного количества абсолютно новых измерительных средств, способных работать энергонезависимо в режиме реального времени в агрессивных условиях, что выходит за рамки прикладных задач цифровизации водоотведения.

Следовательно, в настоящее время существует актуальная потребность в создании методического и информационно-коммуникационного обеспечения цифровой платформы управления водоотведением коммунальных и промышленных объектов (ЦПУВ КПО), которая бы реализовывала прежде всего функцию «Обработка (прогноз) информации о параметрах водоотведения».

Обоснование задач цифровой платформы управления водоотведением. В рамках исследований термин «цифровая платформа» трактуется как адаптивная информационная система реального времени, включающая в себя помимо традиционных обеспечений (аппаратного, математического, системного, программного организационного и ряда других) специализированные компоненты и механизмы, предназначенные для постоянного эволюционного развития: включение новых объектов анализа и управления и постоянное расширение функциональности, интеграция с другими решениями и синтез новых подсистем, миграция на новые программно-аппаратные платформы.

Соответственно, цифровая платформа управления водоотведением коммунальных и промышленных объектов – механизм цифровой трансформации предприятий ВКХ, предусматривающий в перспективе замену объектов управления их цифровыми образами (цифровыми двойниками, цифровыми тенями) с превращением цифровой платформы в цифровую экосистему (информационную систему, представляющую собой комплекс взаимосвязанных сервисов (электронных услуг), покрывающих более 90% функций организаций водопроводно-канализационных хозяйств).

Целью функционирования ЦПУВ КПО будет повышение экономической эффективности и экологической безопасности функционирования систем водоотведения ВКХ на различных жизненных циклах путем использования современных информационно-коммуникационных технологий на основе IoT (интернета вещей), систем обработки и интеллектуального анализа данных, экспертных систем и систем поддержки принятия решений, систем виртуализации реальных объектов.

Планируемые результаты использования ЦПУВ КПО:

- соблюдение нормативов государственных социальных стандартов по обслуживанию населения в области ВКХ при обеспечении экологической безопасности функционирования систем водоотведения и систем очистки сточных вод;
- повышение экономической эффективности функционирования ВКХ на различных этапах жизненных циклов;
- уменьшение ресурсо- и энергозатрат;
- повышение оперативности принятия управленческих решений;
- повышение оперативности и распределенный контроль качества сточных вод в узлах систем водоотведения;
- снижение рисков чрезвычайных ситуаций антропогенного характера в водных объектах за счет прогнозирования и выявления мест их потенциального возникновения;
- масштабирование цифровых двойников (цифровых теней) базовых технологических узлов систем водоотведения на другие коммунальные и промышленные объекты.

Тогда в результате выполнения исследований предприятия ВКХ (в целом) получают (рис. 4):

- методический аппарат практического внедрения, использования и масштабирования ЦПУВ КПО;
- методику внедрения на предприятиях ВКХ цифровых двойников (цифровых теней) технологических узлов систем водоотведения согласно подходам «Цифровой водоканал»;
- программное обеспечение цифровых двойников (цифровых теней) технологических узлов систем водоотведения (в соответствии с ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения»);
- учебно-методическое обеспечение для повышения квалификации и переподготовки специалистов с использованием решений ЦПУВ КПО.

Такой теоретический базис позволит:

- создать эффективную систему управления объектами водоотведения, включая очистку сточных вод;
- повысить ресурсо- и энергоэффективность технологических процессов;
- обеспечить экологическую безопасность системы водоотведения, включая оптимизацию функционирования очистных сооружений;
- качественно планировать операции и выполнять работы по техническому обслуживанию и ремонту агрегатов, оборудования и других составляющих элементов систем водоотведения;
- обеспечить раннее реагирование на потенциальные чрезвычайные ситуации техногенного характера и недопущение их возникнове-

ния на объектах ВКХ, например в случаях попадания залповых концентраций загрязнителей на очистные сооружения;

- системно практико-ориентированно обучать персонал современным цифровым решениям.

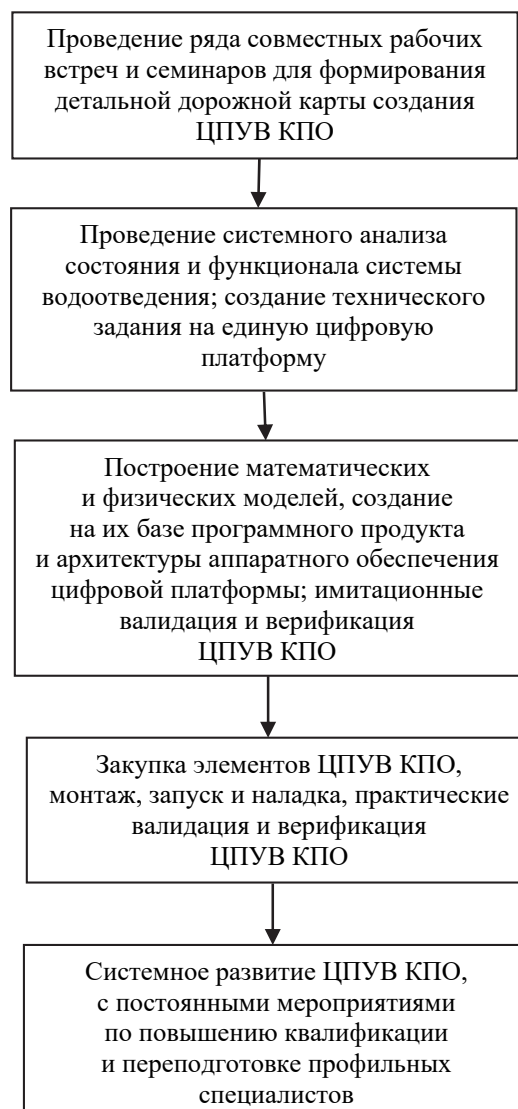


Рис. 4. Последовательность внедрения цифровой платформы управления водоотведением коммунально-промышленных объектов

Органы власти, проектные организации и структуры экспертизы получают:

- методический аппарат (рекомендации) для анализа обоснованности финансовых вложений в структуры предприятий ВКХ;
- методический аппарат (рекомендации) для усовершенствования нормативной базы проектирования, экспертизы и эксплуатации объектов ВКХ, в том числе с учетом требований цифровизации процессов в них;
- единую информационную систему для оперативного и удаленного контроля за состоянием качества сброса сточных вод в природные

водные объекты (при дальнейшем масштабировании результатов проекта в рамках государства);

– методический базис для выполнения региональных проектов «Умный город» (в разрезе создания цифровой экосреды водоотведения и экологической безопасности водных ресурсов) в рамках Государственной программы «Цифровое развитие Беларуси».

Заключение. Оценка Государственной программы «Цифровое развитие Беларуси» на 2021–2025 гг., в разрезе внедрения информационно-коммуникационных технологий в сферы жизнедеятельности общества позволяет сделать заключение о целесообразности создания ЦПУВ КПО и ее внедрения в подпрограмму «Умный город».

Использование методологии IDEF0 при функциональном моделировании процессов водоотведения продемонстрировало сложную иерархичность и многофакторность такого технологического комплекса, что обосновывает применение компьютерно-интегрированной системы как эффективного средства согласования работы различных установок и повышения их эффективности, особенно при рисках чрезвычайных ситуаций.

Анализ уровня автоматизации, т. е. в процентном выражении разницы между расчетным планируемым (желаемым) уровнем автоматизации и рас-

четным фактическим, составляет 35%, таким образом обосновывается актуальность создания методического и информационно-коммуникационного обеспечения цифровой платформы управления водоотведением коммунальных и промышленных объектов (ЦПУВ КПО), которая бы реализовывала прежде всего функцию «Обработка (прогноз) информации о параметрах водоотведения».

Соответственно, цифровая платформа управления водоотведением коммунальных и промышленных объектов выступит в роли эффективного механизма цифровой трансформации предприятий ВКХ, предусматривающего в перспективе замену объектов управления их цифровыми образами (цифровыми двойниками, цифровыми тенями), с превращением цифровой платформы в цифровую экосистему (информационную систему, представляющую собой комплекс взаимосвязанных сервисов (электронных услуг), покрывающих более 90% функций организаций водопроводно-канализационных хозяйств).

Дальнейшие исследования перспективно нацелить на создание адекватных математических моделей элементов и многофакторных процессов систем водоотведения, которые выступят базисом для разработки соответствующего программного обеспечения.

Список литературы

1. Станкевич А. П. Водная стратегия Республики Беларусь на период до 2030 года // Водные ресурсы и климат: материалы V Междунар. водного форума, Минск, 5–6 окт. 2017 г.: в 2 ч. Минск, 2017. Ч. 1. С. 26–27.
2. Войтов И. В. Научные основы рационального управления и охраны водных ресурсов: монография. Минск: БГУ, 2000. 386 с.
3. Семячков К. А. Трансформация общественного сектора в условиях цифровой экономики // Журнал экономической теории. 2018. Т. 15, № 3. С. 545–548.
4. Gartner Identifies the Top 10 Strategic Technology Trends for 2019. URL: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2018-10-15-gartner-identifies-the-top-10-strategic-technology-trends-for-2019> (date of access: 17.01.2024).
5. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex System // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Springer, 2017. P. 85–113.
6. Information Integration for Concurrent Engineering (IICE) Compendium Of Methods Report. URL: <https://www.cs.tcd.ie/Andrew.Butterfield/Teaching/CS4098/IDEF/IDEFcompendium.pdf> (date of access: 17.01.2024).
7. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Терминологический словарь. Часть 1. Стадии жизненного цикла продукции: Р 50.1.031–2001. М.: Изд-во стандартов, 2001. 28 с.
8. Шаршунов В. А. Очистка сточных вод и утилизация их отходов: пособие. Минск: Мисанта, 2020. 642 с.
9. Грудяева Е. К., Душин С. Е., Кузьмин Н. Н. Динамические модели управляемых биохимических процессов очистки сточных вод // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 9. С. 732–737.
10. Алексеев Е. В., Викулина В. Б., Викулин П. Д. Основы моделирования систем водоснабжения и водоотведения: учеб. пособие. М.: Изд-во МИСИ – МГСУ, 2017. 126 с.
11. Ладанюк А. П., Плужников Л. Н., Трегуб В. Г. Проектирование, монтаж и эксплуатация систем автоматизации в пищевой промышленности. М.: Агропромиздат, 1991. 352 с.

12. Штепа В. Н., Шикунец А. Б. Инновационные технологии очистки многокомпонентных водных растворов с противодействием чрезвычайным ситуациям техногенного происхождения // *Природное асяроддзе Палесся і перспектывы развіцця: зб. навук. прац. Брэст, 2022. Вып. 14. С. 184–187.*
13. Штепа В. Н., Шикунец А. Б., Золотых Н. Ю. Управление эколого-энергетической эффективностью водопроводно-канализационных хозяйств // *Научно-технический прогресс в жилищно-коммунальном хозяйстве: сб. тр. Минск, 2022. С. 209–215.*
14. Weijers S. R. *Modelling, Identification and Control of Activated Sludge Plants for Nitrogen Removal.* Eindhoven: Techn. Univ., 2000. 235 p.
15. Штепа В. Н. Концептуальные основы энергоэффективной системы управления комбинированными системами водоочистки // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергет. объединений СНГ.* 2016. № 5. С. 479–487.

References

1. Stankevich A. P. Water Strategy of the Republic of Belarus for the period up to 2030. *Vodnyye resursy i klimat: materialy V Mezhdunarodnogo vodnogo foruma* [Water resources and climate: materials at the International Water Forum]. Minsk, 2017, pp. 26–27 (In Russian).
2. Voitu I. V. *Nauchnyye osnovy ratsional'nogo upravleniya i okhrany vodnykh resursov* [Scientific foundations of rational management and protection of water resources]. Minsk, BSU Publ., 2000. 386 p. (In Russian).
3. Semyachkov K. A. Transformation of the public sector in the digital economy. *Zhurnal ekonomicheskoy teorii* [Journal of Economic Theory], 2018, vol. 15, no. 3, pp. 545–548 (In Russian).
4. Gartner Identifies the Top 10 Strategic Technology Trends for 2019. Available at: URL: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2018-10-15-gartner-identifies-the-top-10-strategic-technology-trends-for-2019> (accessed 17.01.2024).
5. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex System. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems.* Springer, 2017, pp. 85–113.
6. Information Integration for Concurrent Engineering (IICE) Compendium of Methods Report. Available at: <https://www.cs.tcd.ie/Andrew.Butterfield/Teaching/CS4098/IDEF/IDEFcompendium.pdf> (accessed 17.01.2024).
7. R 50.1.031–2001. Continouos acquisition and life-cycle support. Glossary. Part 1. Product life-cycle stages. Moscow, Izdatel'stvo Standardov Publ., 2001. 28 p. (In Russian).
8. Sharshunov V. A. *Ochistka stochnykh vod i utilizatsiya ikh otkhodov* [Digitization of stock felts and the utility of their waste]. Minsk, Misanta Publ., 2020. 642 p. (In Russian).
9. Gruzdeva E. K., Dushin S. E., Kuzmin N. N. Dynamic models of controlled biochemical processes of wastewater treatment. *Izvestiya vyzov. Priborostroyeniye* [News of higher educational institutions. Instrumentation], 2015, vol. 58, no. 9, pp. 732–737 (In Russian).
10. Alekseev E. V., Vikulina V. B., Vikulin P. D. *Osnovy modelirovaniya system vodosnabzheniya i vodootvedeniya* [Fundamentals of modeling water supply and sanitation systems]. Moscow, Izdatel'stvo MISI – MGSU Publ., 2017. 126 p. (In Russian).
11. Ladanjuk A. P., Pluzhnikov L. N., Tregub V. G. *Proyektirovaniye, montazh i ekspluatatsiya system avtomatizatsii v pishchevoy promyshlennosti* [Design, installation and operation of automation systems in the food industry]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1991. 352 p. (In Russian).
12. Shtepa V. N., Shikunec A. B. Innovative technologies for purification of multicomponent aqueous solutions with counteraction to emergency situations of man-made origin. *Pryrodnaye asyiaroddze Palesyya i perspektyvy razvitstyya: zbornik navukovykh prats* [Natural environment of Polesie and development prospects: collection of scientific papers]. Brest, 2022, vol. 14, pp. 184–187 (In Russian).
13. Shtepa V. N., Shikunec A. B., Zolotyh N. Ju. Management of ecological and energy efficiency of water supply and sewerage facilities. *Nauchno-technicheskiy progress v zhilishchno-kommunal'nom khozyaystve: sbornik trudov* [Scientific and technical progress in housing and communal services: proceedings]. Minsk, 2022, pp. 209–215 (In Russian).
14. Weijers S. R. *Modelling, Identification and Control of Activated Sludge Plants for Nitrogen Removal.* Eindhoven, Techn. Univ., 2000. 235 p.
15. Shtepa V. N. Conceptual foundations of an energy-efficient control system for combined water treatment systems. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob'yedineniy SNG* [Energetics. News higher educational institutions and energy associations of the CIS], 2016, no. 5, pp. 479–487 (In Russian).

Информация об авторах

Войтов Игорь Витальевич – доктор технических наук, профессор, ректор. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: rector@belstu.by

Штепа Владимир Николаевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: tppeless@gmail.com

Смелов Владимир Владиславович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой программной инженерии. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: smw@belstu.by

Карпович Дмитрий Семенович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: d.karpovich@belstu.by

Information about the authors

Voitau Igar Vital'evich – DSc (Engineering), Professor, Rector. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rector@belstu.by

Shtepa Vladimir Nikolaevich – DSc (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Life Safety. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tppeless@gmail.com

Smelov Vladimir Vladislavovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Software Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: smw@belstu.by

Karpovich Dzmitry Semenovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: d.karpovich@belstu.by

Поступила 15.05.2024