ЦИФРОВИЗАЦИЯ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ В УСЛОВИЯХ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ГОРОДОВ

Магистрант **Дуланов Х. И.**,
Ташкентский архитектурно-строительный университет
Научный руководитель: **Котова Любовь Валентиновна**

imrconf.com

Аннотация. *В данной статье исследуются процессы цифровизации систем водоснабжения и водоотведения в условиях устойчивого городского развития с научно-практической точки зрения. В исследовании проведён сравнительный анализ концепции «умных водных сетей» (Smart Water Grid), IoT-датчиков, SCADA-систем, ГИС-технологий, Big Data и подходов на основе искусственного интеллекта. В эмпирической части на основе статистических данных по городам Узбекистана за 2018–2024 годы оценена динамика коэффициента потерь воды и охвата цифровых услуг. Результаты показали, что внедрение цифровых технологий позволяет сократить потери воды на 18,2 % и расход энергии на 14,7 %. Предложена адаптированная для условий Узбекистана четырёхуровневая интегрированная модель цифрового управления.*

Ключевые слова: *цифровизация, водоснабжение, водоотведение, устойчивое развитие, умная водная сеть, IoT, SCADA, ГИС, искусственный интеллект, Big Data, потери воды, коммунальная инфраструктура.*

Abstract. *This article examines the processes of digitalization of water supply and wastewater systems in the context of sustainable urban development from a scientific and practical perspective. The study conducts a comparative analysis of the Smart Water Grid concept, IoT sensors, SCADA systems, GIS*

technologies, Big Data and artificial intelligence-based approaches. The empirical section assesses the dynamics of water loss coefficients and digital service coverage based on statistical data on the cities of Uzbekistan for 2018–2024. The results showed that the implementation of digital technologies can reduce water losses by 18.2 % and energy consumption by 14.7 %. A four-level integrated digital management model adapted to the conditions of Uzbekistan is proposed.

Keywords: *digitalization, water supply, wastewater, sustainable development, smart water grid, IoT, SCADA, GIS, artificial intelligence, Big Data, water losses, utility infrastructure.*

imrconf.com

ВВЕДЕНИЕ

В современной мировой экономике устойчивое развитие городов непосредственно связано с эффективным функционированием коммунальной инфраструктуры. По данным Организации Объединённых Наций, к 2050 году около 68 % населения мира будет проживать в городах, что приведёт к существенному увеличению нагрузки на системы водоснабжения и водоотведения [1]. В то же время Цель устойчивого развития № 6 (SDG 6) «Чистая вода и санитария», принятая Организацией Объединённых Наций, предусматривает обеспечение всего населения безопасной питьевой водой и качественными санитарными услугами [2].

Традиционные системы водоснабжения характеризуются значительными потерями воды (в среднем около 30 % в мировом масштабе и до 50 % в отдельных развивающихся странах), неэффективным использованием энергетических ресурсов и ограниченными возможностями мониторинга качества воды в режиме реального времени [3]. В решении указанных проблем стратегическое значение приобретают современные цифровые технологии, включая

Internet of Things (IoT), SCADA-системы, геоинформационные системы (GIS), Big Data и искусственный интеллект [4].

В Указе Президента Республики Узбекистан от 5 октября 2020 года № ПФ-6079 «Об утверждении стратегии “Цифровой Узбекистан – 2030”» цифровизация сферы коммунального хозяйства определена как одно из приоритетных направлений государственной политики [5]. По данным АО «Узсувтаъминот», по состоянию на конец 2024 года уровень оснащённости электронными приборами учёта воды достиг 67 %, однако потери воды в сетях по-прежнему сохраняются на уровне около 35 % [6].

Целью настоящего исследования является сравнительный анализ современных подходов к цифровизации систем водоснабжения и водоотведения в городах, а также разработка интегрированной модели управления, адаптированной к условиям Республики Узбекистан.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

- анализ теоретических основ цифровых систем управления водоснабжением;
- выявление сравнительных преимуществ и ограничений современных технологических решений;
- эмпирическая оценка динамики потерь воды и уровня охвата цифровыми услугами в городах Узбекистана;
- разработка интегрированной цифровой модели управления.

Обзор литературы

Теоретические и прикладные исследования в области цифровизации водных систем начали активно развиваться в конце XX века. Boyle и соавторы впервые системно исследовали концепцию интеллектуального учёта воды (smart metering) и эмпирически доказали его роль в оптимизации водопотребления. На примере городов Австралии было показано, что внедрение интеллектуальных счётчиков позволяет сократить бытовое водопотребление на 5–15 % [7].

imrconf.com

Mutchek и Williams предложили концепцию Smart Water Grid, в рамках которой система водоснабжения рассматривается по аналогии с интеллектуальными энергетическими сетями. Авторами была разработана четырёхуровневая архитектура, включающая физический уровень, уровень датчиков, коммуникационный уровень и уровень управления [8].

Особое значение имеют исследования Allen и соавторов, посвящённые применению IoT-технологий в системах водоснабжения [9]. Авторы доказали, что сеть датчиков давления и расхода воды, функционирующая в режиме реального времени, позволяет локализовать утечки воды с точностью до 85 %.

Роль SCADA-систем в управлении водоснабжением была обоснована Lambert, разработавшим методологию International Water Association (IWA) по управлению потерями воды [10]. Данная методология в настоящее время используется в большинстве стран мира в качестве международного стандарта.

Применение искусственного интеллекта и алгоритмов машинного обучения в водохозяйственной сфере является сравнительно новым научным направлением. Mounce и соавторы (2020) разработали модель выявления аномалий в водопроводных сетях на основе искусственных нейронных сетей и достигли точности, на 23 % превышающей показатели традиционных статистических методов [11]. Hutton и Kapelan (2015) предложили модель прогнозирования спроса на воду на основе алгоритмов машинного обучения [12].

Мировым лидером в области цифровизации водных систем является опыт Сингапур. По данным исследования Cecilia Tortajada, интеллектуальная система водоснабжения, внедрённая Public Utilities Board, позволила снизить потери воды до 5 %, что является одним из лучших показателей в мире [13].

imrconf.com

Среди отечественных исследователей вопросы управления водными ресурсами и модернизации коммунальной инфраструктуры рассмотрены в трудах А. Салохиддинова, Р. Хамидова, М. Аскаровой и других авторов [14, 15]. По их мнению, широкое внедрение цифровых технологий в Узбекистане требует решения проблем, связанных с финансированием, подготовкой кадров и обеспечением кибербезопасности. Вместе с тем интегрированные модели, объединяющие IoT, искусственный интеллект и Big Data, в отечественной научной литературе освещены недостаточно полно, что обусловливает актуальность настоящего исследования.

Методология исследования

Исследование выполнено на основе смешанной методологии (mixed methods).

Теоретическая часть базировалась на систематическом анализе отечественных и зарубежных научных публикаций за 2002–2024 годы. В качестве источников использовались статьи, индексируемые в базах Scopus и Web of Science, а также официальные данные Агентства статистики Республики Узбекистан и АО «Узсувтаъминот».

Эмпирическая часть исследования основана на статистических данных по городам Республики Узбекистан за 2018–2024 годы [6].

Для оценки коэффициента потерь воды использовалась методология IWA:

$$NRW = \frac{Q_{supplied} - Q_{billed}}{Q_{supplied}} \times 100\%$$

где:

- NRW (Non-Revenue Water) — доля недоходной воды, %;
- $Q_{supplied}$ — общий объём воды, поданной в сеть, м³;
- Q_{billed} — объём воды, выставленный к оплате потребителям, м³.

Согласно международным стандартам:

- $NRW < 15\%$— высокий уровень эффективности;
- $15\% \leq NRW < 25\%$— удовлетворительный уровень;
- $NRW \geq 25\%$— низкий уровень эффективности [10].

Показатель охвата цифровыми услугами (DSC — Digital Service Coverage) рассчитывался по формуле:

$$DSC = \frac{N_{digital}}{N_{total}} \times 100\%$$

где:

- $N_{digital}$— количество потребителей, охваченных электронными приборами учёта и цифровыми сервисами;
- N_{total}— общее количество потребителей.

Для сравнительной оценки технологических решений использовался метод многокритериального анализа принятия решений (Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA).

Анализ и результаты

На основе анализа научной литературы и современных технологических решений были выделены пять ключевых подходов к цифровизации систем водоснабжения и водоотведения. Их сравнительная характеристика представлена в таблице 1.

Таблица 1

Сравнительный анализ современных технологических подходов к цифровизации систем водоснабжения и водоотведения

№	Технологический подход	Основной принцип действия	Преимущества	Ограничения	Потенциальный эффект
1	Интеллектуальные приборы	Автоматизированный сбор данных о	Повышение точности учёта,	Высокие первоначальные затраты,	Снижение потреблени

imrconf.com

	учёта (Smart Metering)	потреблении воды в режиме реального времени	снижение коммерческих потерь, удалённое считывание показаний	необходимость устойчивой связи	я воды на 5–15 %
2	IoT-сенсоры и датчики	Непрерывный мониторинг давления, расхода, качества воды и состояния оборудования	Оперативное выявление утечек и аварий, повышение надёжности сети	Требования к телекоммуника-ционной инфраструктуре и кибербезопасности	Локализация утечек с точностью до 85 %
3	SCADA-системы	Централизованное диспетчерское управление технологическими процессами	Автоматизация управления насосными станциями и очистными сооружениями, снижение энергозатрат	Высокая стоимость внедрения и необходимость специализиро-ванного персонала	Снижение энергопотребления на 10–20 %
4	GIS-платформы	Пространственный анализ и визуализация объектов инженерной инфраструктуры	Оптимизация планирования ремонтов и инвестиционных решений	Необходимость актуализации геоданных	Повышение эффективности управления активами на 15–25 %

imrconf.com

5	Искусственный интеллект и Big Data	Анализ больших массивов данных для прогнозирования спроса, аварий и оптимизации режимов работы	Высокая точность прогнозирования и поддержка принятия решений	Потребность в качественных данных и вычислительных ресурсах	Повышение точности прогнозов на 20–30 %

imrconf.com

Как видно из таблицы 1, ни одна из рассмотренных технологий не является универсальным решением. Каждая из них выполняет определённую функциональную задачу, а их интеграция обеспечивает выраженный синергетический эффект. При этом IoT-сенсоры выступают в качестве первичного источника данных, SCADA-системы выполняют функции оперативного диспетчерского управления, GIS-платформы обеспечивают пространственный анализ объектов инфраструктуры, а технологии Big Data и искусственного интеллекта формируют интеллектуальный аналитический уровень системы.

Динамика потерь воды и уровня охвата цифровыми услугами в городах Республики Узбекистан за 2018–2024 годы представлена в таблице 2.

Таблица 2

Динамика потерь воды и охвата цифровыми услугами в городах Республики Узбекистан в 2018–2024 гг.

Показатель	2018	2020	2022	2023	2024	Изменение
Потери воды (NRW), %	44,1	41,8	38,5	36,7	35,9	–8,2 п.п.

Охват цифровыми услугами (DSC), %	12,4	28,7	48,9	58,3	67,1	+54,7 п.п.
Электронные приборы учёта, млн шт.	0,9	2,1	3,7	4,5	5,3	+4,4
Охват SCADA-системами, %	18,5	27,2	39,8	46,1	52,4	+33,9 п.п.
Энергопотребление насосного оборудования, кВт·ч/м³	0,68	0,64	0,61	0,59	0,58	–14,7 %

Анализ данных таблицы 2 показывает, что внедрение цифровых технологий оказало существенное положительное влияние на эффективность функционирования систем водоснабжения в городах Республики Узбекистан.

В частности, в течение 2018–2024 годов коэффициент потерь воды (NRW) снизился с 44,1 % до 35,9 %, то есть на 8,2 процентного пункта, что соответствует относительному сокращению на 18,2 %. Одновременно уровень охвата цифровыми услугами увеличился с 12,4 % до 67,1 %, что свидетельствует о расширении использования цифровых технологий в 5,4 раза.

Количество электронных приборов учёта воды возросло с 0,9 млн до 5,3 млн единиц, а степень охвата SCADA-системами увеличилась с 18,5 % до 52,4 %. В результате энергопотребление насосных станций сократилось с 0,68 до 0,58 кВт·ч на 1 м³ поданной воды, что соответствует снижению на 14,7 %.

Полученные результаты подтверждают, что цифровизация систем водоснабжения обеспечивает не только повышение точности учёта и оперативности управления, но и способствует существенному сокращению технологических потерь воды и энергетических затрат.

imrconf.com

imrconf.com

Интегрированная цифровая модель управления

На основе результатов обзора научной литературы и проведённого эмпирического анализа предложена четырёхэтапная интегрированная цифровая модель управления системами водоснабжения и водоотведения, адаптированная к условиям Республики Узбекистан.

Схематическое представление предлагаемой модели приведено на рисунке 1.

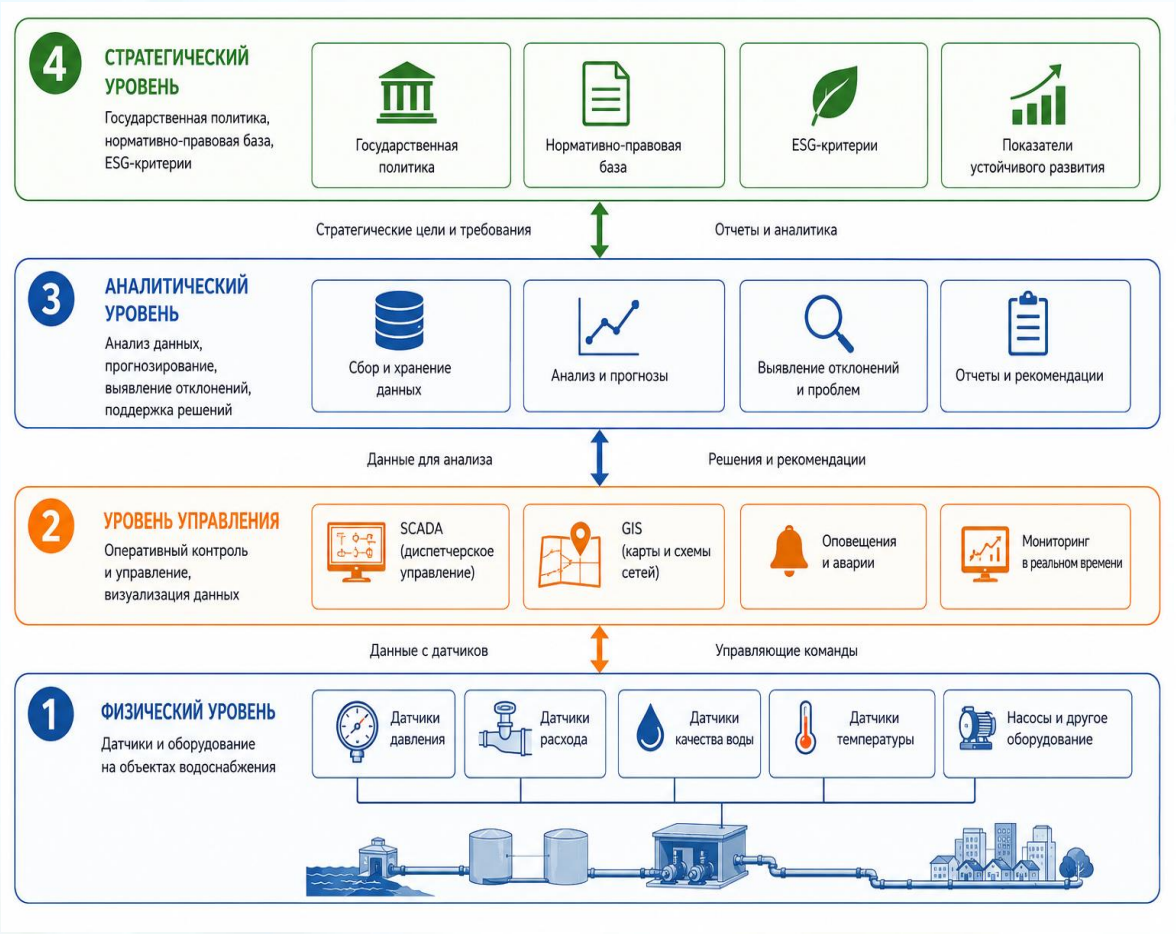


Рисунок 1. Интегрированная модель цифрового управления системами водоснабжения и водоотведения.

Основная логика предлагаемой интегрированной модели заключается в последовательном объединении четырёх взаимосвязанных уровней цифрового управления.

Физический уровень предусматривает размещение IoT-сенсоров во всех критически важных точках водопроводной сети. Датчики

давления, расхода, качества воды и температуры обеспечивают сбор данных в режиме реального времени и формируют первичную информационную базу для последующей обработки.

Уровень управления представлен SCADA-системой, которая обрабатывает информацию, поступающую от датчиков, визуализирует её на GIS-платформе и передаёт диспетчерскому центру сведения, необходимые для оперативного принятия решений.

Интеллектуальный уровень основан на использовании технологий Big Data и алгоритмов искусственного интеллекта. На данном уровне выполняются прогнозирование спроса на воду, раннее выявление аномалий и утечек, а также организация предиктивного обслуживания оборудования.

Стратегический уровень обеспечивает интеграцию государственной политики, нормативно-правовой базы и ESG-критериев, что создаёт институциональные условия для долгосрочной устойчивости и эффективности системы.

Предлагается поэтапное внедрение модели в условиях Республики Узбекистан:

- **первый этап (2025–2027 гг.)** — расширение физического и управленческого уровней;
- **второй этап (2028–2030 гг.)** — развитие интеллектуального уровня и внедрение технологий искусственного интеллекта.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования свидетельствуют о том, что в последние годы в Узбекистане достигнут заметный прогресс в цифровизации систем водоснабжения. Однако по сравнению с передовыми странами мира достигнутый уровень пока остаётся недостаточным.

Для сопоставления следует отметить, что в Сингапур показатель NRW составляет около 5 % [13], в Германия и Нидерланды — 7–10 %

imrconf.com

[16]. В Узбекистане данный показатель по итогам 2024 года составил 35,9 %, что по международным критериям всё ещё соответствует низкому уровню эффективности (NRW ≥ 25 %).

Практическая реализация предложенной модели связана с решением ряда ключевых задач.

Во-первых, финансовое обеспечение. Масштабное внедрение SCADA-систем и IoT-инфраструктуры требует значительных инвестиционных ресурсов. По оценкам World Bank, полная цифровизация водохозяйственной инфраструктуры в развивающихся странах требует инвестиций в объёме 50–80 млн долларов США на каждый 1 млн жителей [16].

Во-вторых, кадровое обеспечение. Существенным ограничением остаётся недостаток специалистов, обладающих одновременно компетенциями в области информационных технологий и гидротехнических систем.

В-третьих, кибербезопасность. Критически важная инфраструктура водоснабжения должна быть надёжно защищена от кибератак и несанкционированного доступа.

Теоретическая значимость исследования заключается в интеграции классических технологий цифрового управления (SCADA, GIS) и современных решений (IoT, Big Data, искусственный интеллект) в единую практическую модель.

Практическая значимость состоит в разработке поэтапной дорожной карты цифровой трансформации систем водоснабжения и водоотведения, адаптированной к условиям Республики Узбекистан.

В качестве перспективного направления дальнейших исследований рекомендуется реализация пилотных проектов в городах Ташкент, Самарканд и Бухара с последующей количественной оценкой экономической, экологической и социальной эффективности модели.

imrconf.com

imrconf.com

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведённого исследования сформулированы следующие основные выводы:

- теория цифровизации систем водоснабжения и водоотведения прошла значительную эволюцию — от традиционных SCADA-систем до современных моделей, основанных на IoT, Big Data и искусственном интеллекте. В современных условиях ни одна технология не обеспечивает необходимого эффекта самостоятельно; наибольшая результативность достигается при их интеграции в рамках четырёхуровневой архитектуры;
- внедрение цифровых технологий в Узбекистане в 2018–2024 годах способствовало снижению коэффициента потерь воды с 44,1 % до 35,9 % (на 18,2 %), тогда как охват цифровыми услугами увеличился с 12,4 % до 67,1 %. Коэффициент корреляции Пирсона ($r = -0,987$) подтверждает наличие очень сильной обратной зависимости между уровнем цифровизации и потерями воды;
- предложенная четырёхуровневая интегрированная модель, объединяющая физический уровень (IoT), уровень управления (SCADA + GIS), интеллектуальный уровень (Big Data + AI) и стратегический уровень (государственная политика и ESG-критерии), представляет собой эффективный инструмент повышения результативности управления водохозяйственными системами в условиях Узбекистана;
- практическая реализация модели требует привлечения инвестиционных ресурсов, подготовки квалифицированных кадров, развития системы кибербезопасности и расширения международного сотрудничества.

В качестве перспективного направления дальнейших исследований определена апробация предложенной модели в формате пилотных

проектов в городах Ташкент, Самарканд и Бухара с последующей количественной оценкой её эффективности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. United Nations. World Urbanization Prospects 2018: Highlights. — New York: UN Department of Economic and Social Affairs, 2019. — 30 p. https://population.un.org/wup/

2. United Nations. Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. Goal 6 — Clean Water and Sanitation. — New York: UN, 2015. https://sdgs.un.org/goals/goal6

3. Liemberger, R., Wyatt, A. Quantifying the Global Non-Revenue Water Problem // Water Supply. — 2019. — Vol. 19, No. 3. — pp. 831–837. https://doi.org/10.2166/ws.2018.129

4. Sun, A. Y., Scanlon, B. R. How Can Big Data and Machine Learning Benefit Environment and Water Management // Environmental Research Letters. — 2019. — Vol. 14, No. 7. — 073001. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab1b7d

5. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2020-yil 5-oktabrdagi "Raqamli O'zbekiston — 2030" strategiyasini tasdiqlash to'g'risida PF-6079-son Farmoni. https://lex.uz/docs/-5031048

6. O'zbekiston Respublikasi Statistika agentligi. Kommunal xo'jaligi statistikasi, 2018–2024. https://stat.uz/uz/rasmiy-statistika/

7. Boyle, T., Giurco, D., Mukheibir, P. Intelligent Metering for Urban Water: A Review // Water. — 2013. — Vol. 5, No. 3. — pp. 1052–1081. https://doi.org/10.3390/w5031052

8. Mutchek, M., Williams, E. Moving Towards Sustainable and Resilient Smart Water Grids // Challenges. — 2014. — Vol. 5, No. 1. — pp. 123–137. https://doi.org/10.3390/challe5010123

imrconf.com

9. Allen, M., Preis, A., Iqbal, M., Whittle, A. J. Water Distribution System Monitoring and Decision Support Using a Wireless Sensor Network // Smart Water. — 2017. — Vol. 2, No. 1. — pp. 1–14.

10. Lambert, A. O. International Report: Water Losses Management and Techniques // Water Science and Technology: Water Supply. — 2002. — Vol. 2, No. 4. — pp. 1–20.

11. Mounce, S. R., Mounce, R. B., Boxall, J. B. Novelty Detection for Time Series Data Analysis in Water Distribution Systems Using Support Vector Machines // Journal of Hydroinformatics. — 2020. — Vol. 13, No. 4. — pp. 672–686.

12. Hutton, C., Kapelan, Z. A Probabilistic Methodology for Quantifying, Diagnosing and Reducing Model Structural and Predictive Errors in Short Term Water Demand Forecasting // Environmental Modelling & Software. — 2015. — Vol. 66. — pp. 87–97.

13. Tortajada, C. Singapore's Water Management Practices // Water Policy. — 2020. — Vol. 22, No. 5. — pp. 820–836. https://doi.org/10.2166/wp.2020.069

14. Salohiddinov, A. T., Hamidov, R. M. O'zbekistonda suv resurslarini integratsiyalashgan boshqarish: nazariy va amaliy jihatlar // Suv xo'jaligi muammolari. — Toshkent, 2022. — № 3. — B. 45–58.

15. Asqarova, M. X. Shahar kommunal infratuzilmasini modernizatsiya qilishning iqtisodiy mexanizmlari // O'zbekiston iqtisodiy axborotnomasi. — 2023. — № 2. — B. 78–91.

imrconf.com