

**СОВРЕМЕННЫЕ СТРАТЕГИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСКУССТВЕННОГО  
ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ АВАРИЙ В ТЕХНИЧЕСКИХ  
СИСТЕМАХ РЕСУРСОСНАБЖЕНИЯ**

**Капанский А.А.**

**Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого (Беларусь),  
г. Гомель, Республика Беларусь  
kapanski@mail.ru**

**Резюме:** *АКТУАЛЬНОСТЬ.* Значимость внедрения передовых технологий, таких как Интернет вещей (IoT), машинное обучение и искусственный интеллект, в современных условиях повышения требований к надежности и эффективности систем ресурсоснабжения становится всё более очевидной. Способность этих технологий к сбору, обработке и анализу данных в реальном времени открывает новые перспективы для оптимизации работы и предотвращения аварий. **ЦЕЛЬ.** Исследование направлено на анализ современных методов и технологий искусственного интеллекта и машинного обучения, применяемых в технических системах, с акцентом на возможности IoT для создания эффективной информационной системы. Эта система предназначена для дальнейшего использования в разработке и обучении моделей, способных к прогнозированию аварий и оптимизации распределения ресурсов. **МЕТОДЫ.** В рамках работы был проведен глубокий анализ литературных источников, посвященных применению сверточных и рекуррентных нейронных сетей, алгоритмов градиентного бустинга, моделей многослойного персептрона, методов опорных векторов и K-ближайших соседей в контексте систем водоснабжения. Особое внимание уделялось изучению интеграции технологий IoT для сбора данных, передаваемых через датчики посредством сетей LoRaWAN и базовых станций операторов сотовой связи. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В результате исследования было подтверждено, что использование передовых методов искусственного интеллекта в сочетании с технологиями Интернета вещей значительно повышает точность прогнозирования аварий и эффективность управления системами водоснабжения. В статье определена важность создания надежной информационной системы, способной собирать и анализировать большие объемы данных в реальном времени, что является критическим фактором для успешного применения прогностических моделей. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Исследование подчеркивает значительный потенциал интеграции методов машинного обучения в IoT-инфраструктуру водоснабжения. В статье демонстрируется, что выбор подходящих методов сбора и передачи данных, включая протокол MQTT, играет ключевую роль в создании эффективной информационной базы для обучения моделей. Результаты исследования предоставляют ценную основу для разработки будущих инновационных решений в области управления ресурсами водоснабжения.

**Ключевые слова:** *искусственный интеллект; машинное обучение; аварийные ситуации; технические системы; интернет вещей (IoT); системы водоснабжения; мониторинг гидравлического давления; протоколы передачи данных; интеграция датчиков; цифровые двойники систем.*

**Для цитирования:** Капанский А.А. Современные стратегии использования искусственного интеллекта для предотвращения аварий в технических системах ресурсоснабжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2024. Т. 16. № 1 (61). С. 38-51.

**MODERN STRATEGIES FOR USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO AVOID  
ACCIDENTS IN TECHNICAL RESOURCE SUPPLY SYSTEMS**

**Kapansky A.A.**

**Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi, Gomel, Republic of Belarus  
kapanski@mail.ru**

**Abstract:** *RELEVANCE.* The importance of introducing advanced technologies, such as the Internet of Things (IoT), machine learning and artificial intelligence, in modern conditions of increasing requirements for the reliability and efficiency of resource supply systems is becoming increasingly obvious. The ability of these technologies to collect, process and analyze data in real time opens up new prospects for optimizing operations and preventing accidents. *PURPOSE.* The study is aimed at analyzing modern methods and technologies of artificial intelligence and machine learning used in technical systems, with an emphasis on the capabilities of IoT for creating an effective information system. This system is intended for further use in the development and training of models capable of predicting accidents and optimizing resource allocation. *METHODS.* As part of the work, an in-depth analysis of literature sources was carried out on the use of convolutional and recurrent neural networks, gradient boosting algorithms, multilayer perceptron models, support vector machines and K-nearest neighbors in the context of water supply systems. Particular attention was paid to studying the integration of IoT technologies for collecting data transmitted through sensors via LoRaWAN and existing cellular networks. *RESULTS.* The study confirmed that the use of advanced artificial intelligence methods in combination with Internet of Things technologies significantly improves the accuracy of accident prediction and the efficiency of water supply system management. The article identifies the importance of creating a reliable information system capable of collecting and analyzing large volumes of data in real time, which is a critical factor for the successful application of predictive models. *CONCLUSION* The study highlights the significant potential of integrating machine learning techniques into IoT water infrastructure. The article demonstrates that choosing appropriate data collection and transmission methods, including the MQTT protocol, plays a key role in creating an effective information base for training models. The results of the study provide a valuable basis for the development of future innovative solutions in the field of water resource management.

**Keywords:** *artificial intelligence; machine learning; emergency situations; technical systems; Internet of Things (IoT); water supply systems; hydraulic pressure monitoring; data transfer protocols; sensor integration; digital twins of systems.*

**For citation:** Kapansky A.A. Modern strategies for using artificial intelligence to avoid accidents in technical resource supply systems. *KAZAN STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY BULLETIN.* 2024. T. 16. No. 1 (61). P. 38-51.

### **Введение (Introduction)**

В современном мире технические системы играют ключевую роль в обеспечении устойчивой транспортировки и распределения жизненно важных ресурсов. С развитием социальной инфраструктуры эти системы не только расширяются, но и усложняются, что приводит к увеличению риска аварийных ситуаций. Аварии могут иметь серьезные экологические, экономические и социальные последствия, делая вопросы надежности и бесперебойности систем ресурсоснабжения особенно актуальными. Технологические нарушения могут возникать по различным причинам, включая износ материалов и непредвиденные естественные явления. Сложность мониторинга и обслуживания технических систем усугубляется их географической протяженностью и часто устаревшим оборудованием.

В статье делается акцент на технических системах водоснабжения, где традиционные методы анализа основываются на фактических отказах машин и механизмов, которые приводят к отклонению технологических параметров от допустимых значений, что требует немедленного вмешательства и выезда оперативно-диспетчерской бригады. Такой подход реагирования на аварии может оказаться неэффективным из-за ограниченности человеческих ресурсов и удаленности объектов. Это, в свою очередь, приводит к задержкам в обнаружении и устранении технологических сбоев, увеличивая среднее время восстановления водоснабжения. В этих условиях искусственный интеллект (ИИ) предлагает решения, способствующие повышению эффективности и бесперебойности. Использование современных технологий и методов машинного обучения (МО) позволяет не только оптимизировать процессы, но и предсказать потенциальные аварии, что особенно важно и актуально в сферах социально значимых инфраструктур. Целью данной статьи является изучение и анализ современных методов и практик, направленных на повышение устойчивости и надежности систем водоснабжения. Это исследование акцентирует внимание на критически важных аспектах эксплуатации данных систем, включая борьбу с утечками, управление неконтролируемыми потерями давления и оптимизацию распределения

водных ресурсов.

Практическая значимость работы выражается в создании методологической и технологической базы для разработки и внедрения прогностических моделей, которые смогут минимизировать риски аварий в системах водоснабжения. Основываясь на сборе и аналитической обработке статистических данных, исследование использует последние достижения в сфере технологий передачи данных, обеспечивая тем самым актуальность и инновационность подходов.

Научная значимость данной статьи заключается в апробации передовых методов сбора данных в системах водоснабжения с использованием технологий интернета вещей (IoT). Экспериментальное применение этих подходов позволило не только совершенствовать процессы обработки данных в реальном времени, но и создать обширную информационную базу для последующего анализа. Рассмотренные в статье методы получения данных технологических параметров водоснабжения заложили основу для разработки и тестирования прогностических моделей, использующих алгоритмы машинного обучения и рекуррентные нейронные сети. Эти модели открывают перспективы для предсказания временных рядов и управления рисками возникновения аварийных ситуаций в системах водоснабжения и будут подробно рассмотрены в рамках цикла статей в следующих публикациях. Научное значение работы также заключается в демонстрации потенциала быстрой интеграции IoT-технологий в технические системы ресурсоснабжения для повышения их адаптивности и управляемости.

#### *Литературный обзор (Literature review)*

В области искусственного интеллекта и машинного обучения существует множество методов анализа больших объемов данных, собираемых с датчиков в реальном времени, которые позволяют своевременно выявлять аномалии и потенциальные угрозы. Внедрение алгоритмов машинного обучения дает возможность создавать цифровые двойники технических систем, что становится мощным инструментом для моделирования и тестирования различных сценариев эксплуатации. Прогностические модели выступают эталоном для оценки отклонений технологических параметров, что способствует более глубокому пониманию отдельных элементов и системы в целом. В рамках мирового опыта особое внимание в этом контексте уделяется совершенствованию передовых методов, которые используются для предотвращения аварий, а также оценке их вклада в улучшение управления и поддержания инфраструктуры водоснабжения. Несмотря на то, что основное внимание в статье отводится системам водоснабжения, стоит отметить, что алгоритмы искусственного интеллекта также активно используются или могут адаптироваться к другим областям, таким как газоснабжение, нефтяная промышленность или теплоснабжение. Примеры, приведенные в литературном обзоре, демонстрируют эффективность этих технологий в различных технических системах.

На этом фоне особенно выделяется статья Эзечи и Окоро-афора 2023 года [1], иллюстрирующая применение методов машинного обучения в системах газоснабжения. В публикации исследуется эффективность применения рекуррентных нейронных сетей (англ. Recurrent neural network, RNN) и метода К-ближайших соседей для обнаружения утечек газа. Сравнительный анализ различных моделей МО демонстрирует преимущество RNN в подобного рода задачах, благодаря их способности к самообучению и обработке больших данных, что отражается высокой точностью предсказаний в условиях изменяющейся информационной среды.

В другой статье Лю, Чена и Ху 2022 года [2], представлены результаты применения методов машинного обучения для моделирования сценариев отказа трубопроводов с дефектами при увеличении давления. Алгоритмы прогнозирования реализованы на основе методов искусственных нейронных сетей (англ. Artificial neural network, ANN), градиентного XGBoost (англ. Extreme Gradient Boosting, XGB) и категориального CatBoost (CAT) бустинга. Эти модели обучались на основе статистики, полученной из реального осмотра трубопроводов, а также на результатах, предоставленных методом конечных элементов, который применялся для предсказания порывов. В результате оценки качества моделей алгоритм машинного обучения CatBoost показал наиболее точные прогнозы аварий с минимальными ошибками. Это приводит к выводу, что эффективность моделей ИИ в анализе в сочетании с классическими методами делает их мощным инструментом для оценки безопасности трубопроводов, особенно в условиях изменения эксплуатационных режимов, требующих коррекции технологических параметров.

Переходя к исследованию Фана Х. и др. [3], наблюдается схожее применение моделей МО для прогнозирования порывов водопроводных труб. Авторы статьи демонстрируют эффективность используя модели градиентного бустинга на базе библиотеки

LightGBM (англ. Light Gradient Boosting Machine), разработанной компанией Microsoft. Предложенный в статье подход к прогнозированию отличается всесторонней интеграцией различных наборов данных, включая инженерные, геологические, климатические и социально-экономические факторы. Это исследование подчеркивает влияние общественных аспектов на вероятность отказов трубопроводов, предполагая более глубокие методы оценки рисков аварийности в технических системах водоснабжения.

Продолжая тему применения машинного обучения в системах водоснабжения, статья Саураба Н., Тимбадия П. В. и Патела П. Л. [4], опубликованная в журнале *ISH Journal of Hydraulic Engineering* в 2023 году, открывает новые возможности исследований. В публикации фокус делается на проблеме контроля утечек воды и описывается применение обратного инженерного подхода для их обнаружения. Основная идея работы состояла в том, чтобы путем решения задач классификации и регрессии с помощью искусственных нейронных сетей и машин опорных векторов (англ. support vector machine, SVM) определить отклонения в давлении или расходе воды, вызванные утечками. Исследование проводилось в двух сценариях: в первом измерения проводились только для давления, во втором – для расхода воды в системе. Авторами разработаны и обучены модели многослойного перцептрона (англ. Multilayered perceptron, MLP) и многоуровневой классификации и регрессии SVM. Установлено, что модель нейронной сети ANN в задачах классификации и регрессии показывает лучшие результаты по сравнению с моделью SVM в обнаружении утечек в двух сценариях. В публикации подчеркивается, что производительность модели может быть улучшена за счет оптимизации количества входных данных в процессе обучения и является важной задачей исследования.

В контексте этого обзора стоит упомянуть и другое исследование, проведенное Момени А. и Пиратла К. Р., опубликованное в 2022 году [5]. Для контроля отклонений технологических величин авторы предлагают брать за основу укрупненную гидравлическую модель водоснабжения, учитывающую состояние трубопроводов на основе мониторинга фактических значений расходов и давления в сочетании с методами машинного обучения. Такой метод был продемонстрирован на эталонной водораспределительной сети и показал свою эффективность. Исследование формирует понимание того, как современные методы ИИ и МО могут быть интегрированы в управление водоснабжением, повышая точность и эффективность обнаружения утечек или аварий.

В статье Цая Ю. Л. и соавторов «Использование сверточных нейронных сетей в разработке системы обнаружения утечек в водопроводных трубах и определения их местоположения», опубликованной в 2022 году в журнале *Applied Sciences*, демонстрируется система локализации порывов труб с применением моделей глубокого обучения, интеллектуального звукового обнаружения утечек в сочетании концепцией технологии Интернета вещей [6]. Авторы используют сверточную нейронную сеть (англ. Convolutional neural network, CNN) для детектирования утечек, достигая точности более 95% после обучения. Исследование показывает практическую значимость алгоритмов машинного обучения, которая может сократить затраты на раскопки на 26% и улучшить эффективность обнаружения порывов трубопроводов.

Акцент на инновационные подходы делается в исследовании Роблес-Веласко А. и соавторов, опубликованном в журнале «*Sustainability*» в 2021 году, где авторы фокусируются на проблеме прогнозирования отказов в водопроводных сетях [7]. Для классификации труб по их предрасположенности к порывам применялась искусственная нейронная сеть (ANN). В качестве параметров модели выступали физические (диаметр, длина, материал и др.) и операционные (расход воды, давление, температуры и др.) показатели. Эффективность этого подхода демонстрируется на примере двух стратегий обработки данных: при работе с недостаточным объемом данных (недостаточная выборка), когда информации мало для надежных прогнозов, и при избыточном (перенасыщенном) объеме данных, когда информации слишком много, что тоже может затруднить анализ. Модель классификации на основе ANN, протестированная на реальных данных водопроводной сети Испании, подчеркивает необходимость баланса в обучающей выборке данных для повышения точности прогнозов.

В 2018 году К. Онуквугха и Э. Н. Осеги продемонстрировали, как интегрированные системные модели, сочетающие машинное обучение и нейронные сети, могут использоваться для мониторинга и прогнозирования давления в нефтегазовых трубопроводах [8]. Этот подход, также подчеркивающий важность сочетания различных технологий для улучшения точности и надежности прогнозов, что может служить примером для адаптации к системам водоснабжения, сочетая классические методы гидравлического анализа с алгоритмами искусственного интеллекта.

Продолжая обсуждение инноваций в области мониторинга и прогнозирования в системах водоснабжения, важно отметить исследование Лю В., Се Цзы и Сун З., которое фокусируется на применении моделей глубокого обучения для предсказания отказов в водопроводных сетях [9]. В этом исследовании использовался алгоритм остаточной нейронной сети (англ. Residual neural network, ResNet), который сравнивался с классической сверточной нейронной сетью. Алгоритм ResNet превзошел CNN по скорости обучения и точности предсказаний. В исследовании демонстрируется высокая значимость физических факторов, таких как длина и диаметр трубы для прогнозирования аварий. Авторы исследования делают вывод, что с помощью предложенного алгоритма ResNet можно предотвратить более половины отказов, обслуживая менее 10% труб, что значительно способствует повышению эффективности технического обслуживания. Как и в случае с исследованием К. Онукувугха и Э. Н. Осеги, данная работа подчеркивает, что использование глубокого обучения и интеграции различных технологий может значительно улучшить способности к мониторингу и прогнозированию в системах водоснабжения.

Подводя итог литературного обзора, важно отметить, что в сфере прогнозирования аварий и обнаружения утечек в системах водоснабжения наибольшее распространение получили такие технологии, как сверточные и рекуррентные нейронные сети, а также различные алгоритмы градиентного бустинга. Также значимую роль играют модели многослойного персептрона, методы опорных векторов и K-ближайших соседей. Эти модели демонстрируют высокую эффективность в широком диапазоне применений, начиная от точного поиска мест порывов и заканчивая предсказанием снижения давления. Особенно значительны результаты, достигаемые при их интеграции с классическими гидравлическими моделями, что позволяет создавать более точные и надежные системы для управления водоснабжением.

#### ***Материалы и методы (Materials and methods)***

В контексте этого раздела следует сделать фокус, что существует несколько ключевых методов превентивного управления в системах водоснабжения, которые могут варьироваться в зависимости от конкретных требований и характера эксплуатации [10]:

1. Мониторинг и диагностика. Такие технологии играют ключевую роль в определении утечек, оценке состояния оборудования и контроле качества водоснабжения [11, 12].

2. Прогнозирование в технических системах. Методы, основанные на анализе исторических и текущих данных, позволяют предвидеть возможные аварийные ситуации и предупреждать ответственный персонал [9, 13, 14].

3. Информационные технологий. Создание цифровых двойников, которые могут быть использованы для моделирования различных гидравлических сценариев и учитывать потенциальные отклонения для выявления возможных аварий. Это открывает возможности для более глубокого понимания и управления системами водоснабжения [15, 16].

Таким образом, проведенный обзор раскрывает несколько ключевых преимуществ использования методов машинного обучения в управлении надежностью водоснабжения. Во-первых, появляется возможность автоматизировать процессы обнаружения порывов на основе создания цифровой модели технической системы, тем самым уменьшая необходимость ручного мониторинга. Во-вторых, непрерывное обновление данных позволяет создавать прогностические модели для предотвращения аварий до их возникновения.

Однако здесь следует учитывать, что точность обучения моделей во многом зависит от качества и количества информации. В гидравлических системах, данные приходящие от аналоговых датчиков давления, часто зашумлены, что может отражаться на результативности прогнозов. Кроме того, сложность внедрения таких решений в существующие инфраструктуры может создавать как технические, так и эксплуатационные проблемы, которые не рассматриваются в научных публикациях. Актуальные исследования, хотя и демонстрируют, что современные методы и алгоритмы могут быть успешно адаптированы к системам водоснабжения, часто не предоставляют конкретных рекомендаций по их внедрению в действующие системы. В связи с чем, важной задачей остается интеграция датчиков и коммуникационных устройств для непрерывного мониторинга технологических параметров водоснабжения. Такой подход обеспечивает сбор комплексного набора данных, который в дальнейшем может быть использован для обучения и усовершенствования алгоритмов машинного обучения.

#### ***Результаты и обсуждения (Results and discussion)***

В соответствии с проведенным анализом для решения задач прогнозирования, оптимизации, повышения эффективности и надежности эксплуатации системы водоснабжения необходимо обеспечить достаточный уровень информационной поддержки при про-

ведении научных экспериментов. Одним из ключевых факторов, оказывающих влияние на возможность получения достаточного объема и качества данных, является выбор способа и технологии передачи измеряемых технологических параметров водоснабжения. Для создания информационной среды и разработки механизмов взаимодействия с большими объемами данных наиболее актуальным является использование концепции Интернета вещей (Internet of Things, IoT). С помощью IoT устройства и датчики объединяются в единую сеть, что позволяет собирать информацию в режиме реального времени, обрабатывать их на удаленных серверах и принимать решения на основе результатов измерений.

Технологии Интернета вещей в системах городского водоснабжения открывают возможность получать данные о гидравлическом давлении и расходе электроэнергии в режиме реального времени, управлять потреблением воды и проводить анализ его качества на основе собранных данных [17, 18, 19]. Для получения достаточного объема информации необходимо обеспечить бесперебойную и эффективную инфраструктуру, которая включает в себя современные цифровые устройства, протоколы передачи данных, алгоритмы обработки данных, а также надежное хранилище. Значимую роль оказывают сети операторов сотовой связи, обеспечивая передачу данных между датчиками и центрами обработки данных. В контексте систем водоснабжения в роли основного сетевого протокола выступает Internet Protocol (IP), реализующий передачу информации с электронных устройств к серверу. Широкое распространение обретает протокол сетевого уровня LoRaWAN, который определяет, как информация собирается и взаимодействует между устройствами сбора данных. Различные технологии используются для передачи информации при транспортировке, однако, особую актуальность перебрывает протокол прикладного уровня MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), который определяет как информация упаковывается, передается и обрабатывается поверх уровней связи (таких как 3G, LTE и NB-IoT). Эта технология гарантирует надежную передачу данных и имеет ряд особенностей, делающих её «умной» и эффективной при использовании в системах непрерывного мониторинга.

На примере сети LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) рассмотрим различия современных сетевых протоколов от классических. Это технология беспроводной связи, предназначенная для передачи данных на большие расстояния с низким энергопотреблением, которая включает в себя следующие основные компоненты: оконечные устройства (датчики давления, импульсов, температуры и др.); шлюзы (устройства, которые получают данные от конечных устройств и передают их в промежуточную сеть); сетевой сервер (элемент сети, отвечающий за управление сетью, например, установление расписания, синхронизация времени и другие функции); сервер приложений (элемент сети, предназначенный для дистанционного мониторинга работы оконечных устройств, а также сбора и обработки необходимых данных с них) [20, 21, 22]. Сеть LoRaWAN использует звездообразную архитектуру (рис. 1), где устройства передают данные на базовые станции, которые в свою очередь обеспечивают транспорт информации на сервер [23].



Рис. 1. Схема взаимодействия устройств в сети LoRaWAN Fig. 1. Connection diagram of devices in the LoRaWAN network

\*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Такой подход позволяет обеспечить полное покрытие объектов дистанционного контроля, например, таких как станции первого и второго подъема воды, а также повыси-

тельные насосные станции системы водоснабжения находящихся в зоне действия сигнала. Для анализа эффективности применения рассмотренной технологии была развернута радиосеть LoRaWAN, где использовалось оборудование и программное обеспечение серии IoT Vega. В качестве шлюза между оконечными устройствами и сервером выступала базовая станция Vega BC-2.2 с подключённой антенной 868-01, обеспечивающей усиление сигнала на 6 дБи. Для проверки качества покрытия сети использовался тестер ТС-12. В условиях плотной городской застройки дальность радиосвязи достигала порядка 2-3 км в зависимости от угла разворота и высоты размещения антенны (рис. 2).

Для территории г. Гомеля площадью  $\approx 140 \text{ км}^2$  для полного покрытия необходимо реализовать установку  $\approx 7$  базовых станций. При повышении степени усиления антенны возможно снижение числа шлюзов. Вместе с тем, несмотря на возможность сети обеспечивать доставку сообщений без подтверждения и наличие опции подтверждения доставки для критических сообщений, проводимые тесты демонстрировали неустойчивость сигнала при передаче пакетов сообщений от оконечных устройств к сетевому серверу. Это приводило к задержкам в передаче необходимых данных в соответствии с расписанием и их сохранению в архиве до восстановления связи. Такая особенность, несмотря на резервирование данных во внутренней памяти устройства, не позволяла использовать технологию LoRaWAN для построения системы оперативного реагирования на возникающие аварии в сети водоснабжения.

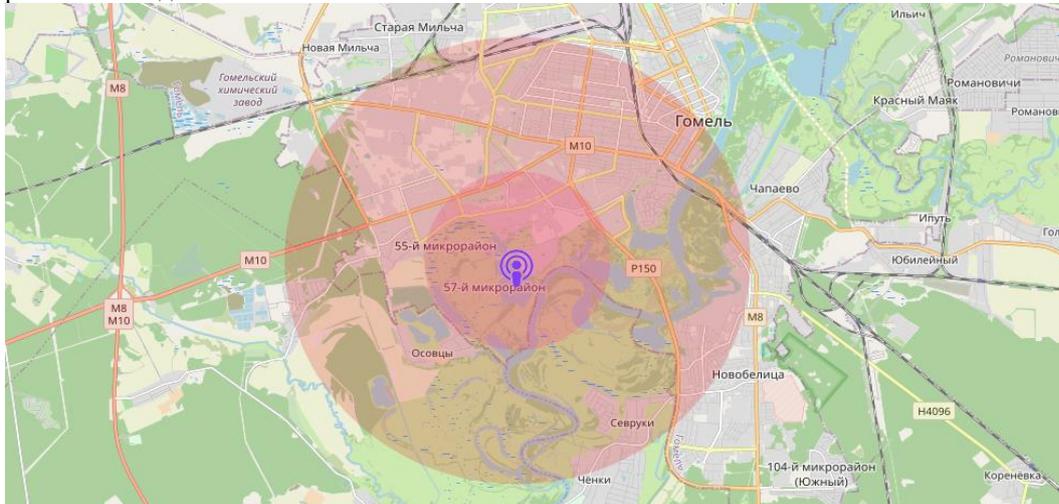


Рис. 2. Зона действия сигнала сети LoRaWAN при установке базовой станции BC-2.2 с подключённой антенна 868-01 с усилением 6 дБи

Fig. 2. The coverage area of the LoRaWAN network signal when installing a BS-2.2 base station with a connected antenna 868-01 with a gain of 6 dBi

\*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Для повышения надежности передачи данных использован классический IP-протокол, который может быть использован в сетях сотовой связи, таких как 2G (GPRS), IoT (NB-IoT) и др. Применение этой технологии задействует базовые станции оператора связи. В качестве протокола для удобства обработки информации использован прикладной протокол MQTT, который обеспечил ряд положительных особенностей [24, 25, 26]:

1. Минимальный объем трафика для передачи сообщений от устройств сбора и передачи данных (УСПД) на сервер. При выходе на связь устройства каждые 5-ть минут для передачи ежеминутных данных измерений месячный объем трафика находился в пределах 50 Мб. Эта особенность значительно сокращает объем передаваемой информации и разгружает телекоммуникационные сети операторов связи. При этом данные, передаваемые в текстовом в формате JSON, содержат достаточный для анализа объем информации. В качестве примера, рассмотрим фрагмент пакета телеметрии устройства NB-12 российской компании «Вега-Абсолют» [27], который включает в себя: причину выхода на связь (ключ «reason»); дату и время формирования среза (ключ «utc»); температуру устройства (ключ «temp»); результаты измерений интерфейса токовой петли (ключ «current») и другие параметры:

```
telemetry:{reason: time; utc: 1678616705; bat: 66; temp: 8.3; adc1: 1527; current: 8.58; bat_drop: 3.21; pulse1: 0; pulse2: 0; s_alarm1: 1; s_alarm2: 1; s_magnet: 0; s_curovr: 0; s_bde :0}} clientId:NB-12
```

Передача данных в структурированном формате предоставляет ряд преимуществ,

таких как упрощение парсинга (автоматический процесс структурирования данных), обработки, хранения и обмена данные между различными языками программирования и серверами.

2. Протокол MQTT обеспечивает доставку сообщений «точно один раз». Это означает, что сообщения будут доставлены без потери и дублирования, что является особенно важным при непрерывном мониторинге значимых параметров технологических процесса водоснабжения.

3. Протокол MQTT использует топики для идентификации устройств и каналов передачи данных. Это позволяют клиентам подписываться на определенные данные и получать только те сообщения, которые им необходимы. Протокол MQTT основан на системе «издатель-подписчик», т.е. устройства могут быть как отправителями (издателями) информации, так и получателями (подписчиками) сообщений (рис.3).

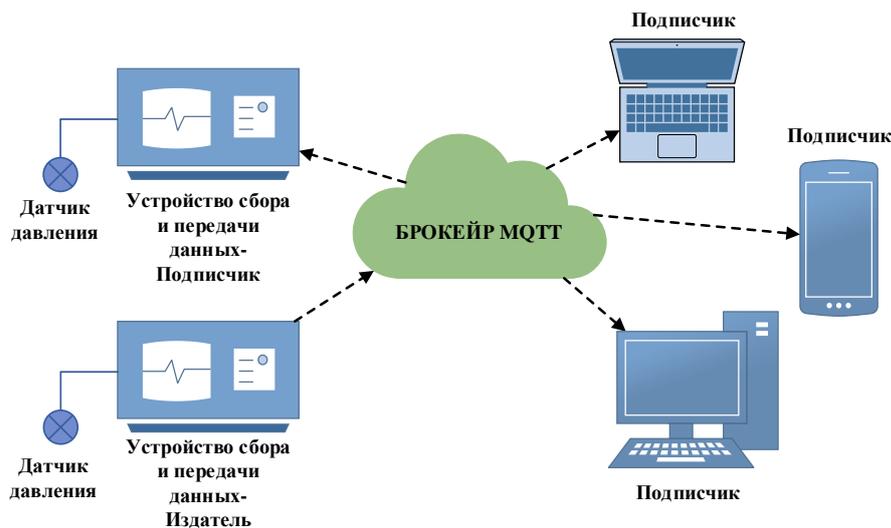


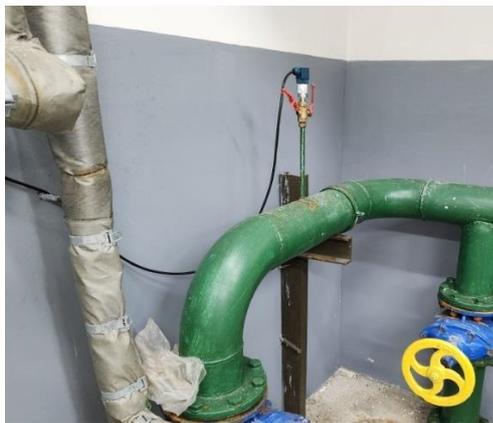
Рис. 3. Схема взаимодействия устройств с использованием протокола прикладного уровня MQTT

Fig. 3. Scheme of device interaction using the MQTT application layer protocol

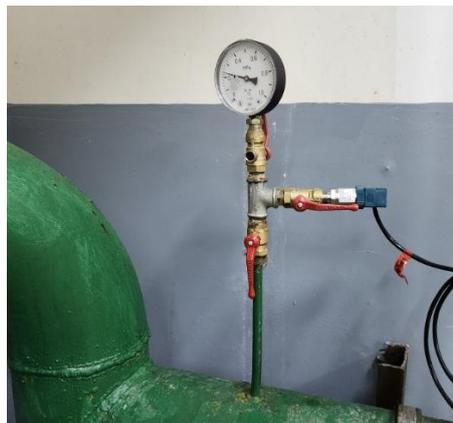
\*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

В контексте Интернета вещей (IoT), где сервер данных, выступая в роли «брокера», обеспечивая поддержку и управление соединениями между устройствами, быстрая интеграция датчиков в гидравлические системы водоснабжения является важным этапом для получения информации о давлении в трубопроводах и насосных станциях. В практических условиях установка датчиков давления может быть выполнена разными методами, включая как более сложные процедуры, так и простые подходы. Первый способ установки датчиков включает в себя комплекс подготовительных и сварочных работ, требующих высокой квалификации, специального оборудования и значительного времени для обеспечения врезки необходимого ответвления (рис. 4 а). В случае наличия схемы с установленным механическим манометр, альтернативный способ интеграции позволяет подключить преобразователь давления напрямую через систему переходников (рис. 4 б), что требует минимального количества компонентов (ниппель, трехходовой кран, крестовина, тройник, заглушка, штуцер и др.).

На рисунке 4 для получения первичной информации о давлении на входе и выходе станции использовался преобразователь давления ПД100 торговой марки Овен, который функционирует на основе принципа источника тока. Это означает, что выходной сигнал датчика представляет собой токовый сигнал, изменяющийся пропорционально измеряемому давлению.



а)



б)

Рис. 4. Подключение первичного преобразователя давления:

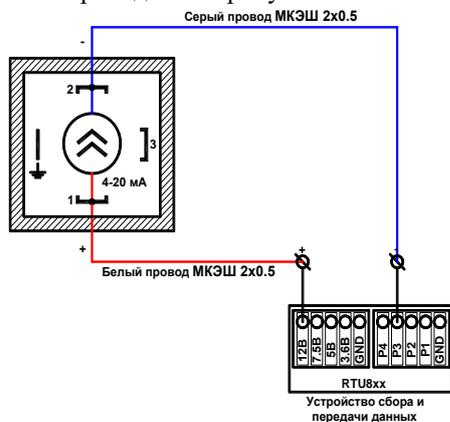
а – путем врезки к трубопроводу; б – через систему переходников

\*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Fig. 4. Connecting the primary pressure transducer:

a – by inserting into the pipeline; b – through the adapter system

Для сбора и передачи токовых данных с датчика использован модем серии RTU-8xx от российской компании TELEOFIS [28]. Это устройство отличается возможностью применения протокола MQTT в сетях связи 2G и NBIoT, а также наличием стандартизированных аналоговых входов 4-20 мА, используемых в системах в промышленных системах автоматизации и контроля. Питание пьезоэлектрического датчика ПД100 осуществлялось с помощью встроенного источника питания модема. В качестве соединительных проводов использовался многожильный кабель с экраном из медной ленты МКЭШ 2x0.5, который обеспечивал защиту передаваемого сигнала от внешних помех. Поясняющая схема подключения пьезоэлектрического датчика давления к устройству сбора и передачи данных приведена на рисунке 5 а.



а)



б)

Рис. 5. Подключение датчика давления к модему RTU-8xx:

а – схема подключения; б – внешний вид монтажа

\*Источник: составлено автором. Source: compiled by the author

Fig. 5. Connecting a pressure sensor to the RTU-8xx modem:

a – connection diagram; b – installation appearance

Для обеспечения надежности приема и передачи информации на сервере установлен специализированный брокер Mosquitto [29]. Это обеспечило гибкость настройки параметров сбора данных, таких как частота измерений и передачи данных и позволило адаптировать систему к различным условиям эксплуатации. Такой подход улучшил не только эффективность мониторинга, но и минимизировал риски сбоев. В дальнейшем это способствовало накоплению обширной статистической базы данных, которая была использована для анализа, разработки превентивных мер и повышения общей устойчивости системы.

Преобразование токовых значений, измеряемых датчиком, к давлению осуществлялось на стороне сервера. Это позволяло оптимизировать процесс обработки данных и снизить нагрузку на оборудование системы мониторинга. Серверная сторона принимала на себя задачу преобразования «сырых» данных измерения и телеметрии, полученных от датчиков и модемов, в удобную для дальнейшего анализа форму, используя классический метод линейной интерполяции:

$$P_{\phi} = P_{\min} + \frac{i_{\phi} - i_{\min}}{i_{\max} - i_{\min}} (P_{\max} - P_{\min}), \quad (1)$$

где  $P_{\phi}$  – фактическое значение давления;

$P_{\min}, P_{\max}$  – минимальное и максимальное значение давления датчика;

$i_{\phi}$  – фактическое значение тока;

$i_{\min}, i_{\max}$  – минимальное (4 мА) и максимальное (20 мА) значение тока.

Итоговое представление данных принимает форму «эпоха – давление». В качестве первого параметра выступает временная метка Unix-время, соответствующая моменту сбора данных, второй параметр – преобразованные значения давления. Такой способ информационного обеспечения позволил сформировать статистику изменения гидравлического давления водопроводной сети, что являлось важным шагом для подготовки базы данных, необходимой для исследования наиболее эффективных методов прогнозирования временных рядов. Это позволило создать основу для дальнейшего исследования и разработки интеллектуальной системы контроля, оперативного реагирования на возникновение аномалий в водопроводных сетях и прогнозирования снижения давления ниже пороговых значений, обеспечивая стабильность и надежность работы инфраструктуры, снижение рисков аварий и минимизации потерь ресурсов, что будет подробно рассмотрено в следующих научных публикациях.

#### **Выводы (Conclusions)**

Исследование, представленное в данной научной работе, подчеркивает важную роль современных технологических решений в обеспечении устойчивости и надежности водоснабжения. С развитием социальной инфраструктуры и возрастающей сложностью технических систем возникает необходимость в более эффективных методах мониторинга и управления, которые способны предупредить или быстро реагировать на потенциальные аварийные ситуации. В этом контексте, искусственный интеллект и машинное обучение выделяются как особенно перспективные инструменты, предоставляя возможности для автоматизации обнаружения порывов, а также для прогнозирования и оптимизации работы систем в реальном времени.

Основываясь на обширном литературном обзоре, исследованы различные подходы и методологии, включая интеграцию устройств сбора и передачи данных к действующей гидравлической сети, применение цифровых двойников и моделей прогнозирования для описания технических систем. Эти методы демонстрируют значительные преимущества в контексте повышения эффективности и надежности водоснабжения, позволяя более глубоко понимать и управлять их работой. Материалы и методы исследования подчеркивают важность информационной поддержки и качества данных для успешного применения алгоритмов искусственного интеллекта.

Результаты исследования демонстрируют, как с помощью современных технологий можно значительно улучшить процессы мониторинга в системах водоснабжения. В этом аспекте ключевую роль играет использование технологий IoT для сбора данных с датчиков и последующего их использования для обучения моделей машинного обучения, что открывает путь для разработки передовых решений по прогнозированию и оптимизации работы технических систем.

Проведенное исследование подтверждает, что интеграция методов машинного обучения, в сочетании с технологиями Интернета вещей и качественным сбором данных, является ключевым фактором для развития устойчивых и адаптивных систем водоснабжения. В статье подчеркивается важность непрерывного информационного обеспечения для обучения прогностических моделей и построения цифрового двойника технической системы, что позволит не только повысить их эффективность и надежность, но и снизить эксплуатационные риски и экономические издержки. Перспективы дальнейшего исследования включают в себя разработку и апробацию новых моделей и алгоритмов, способных

обрабатывать большие объемы данных с высокой точностью и эффективностью, обеспечивая тем самым новый уровень управления инфраструктурой водоснабжения.

### Литература

1. Ezechi C. G., Okoroafor E. R. Integration of Artificial Intelligence with Economical Analysis on the Development of Natural Gas in Nigeria; Focusing on Mitigating Gas Pipeline Leakages //SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition. – SPE, 2023. – C. D031S018R004.
2. Liu W., Chen Z., Hu Y. Failure Pressure Prediction of Defective Pipeline Using Finite Element Method and Machine Learning Models //SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – OnePetro, 2022.
3. Fan X. et al. Machine learning based water pipe failure prediction: The effects of engineering, geology, climate and socio-economic factors //Reliability Engineering & System Safety. – 2022. – Т. 219. – С. 108185.
4. Sourabh N., Timbadiya P. V., Patel P. L. Leak detection in water distribution network using machine learning techniques //ISH Journal of Hydraulic Engineering. – 2023. – С. 1-19.
5. Momeni A., Piratla K. R. Prediction of Water Pipeline Condition Parameters Using Artificial Neural Networks //Pipelines 2022. – 2022. – С. 21-29.
6. Tsai Y. L. et al. Using convolutional neural networks in the development of a water pipe leakage and location identification system //Applied Sciences. – 2022. – Т. 12. – №. 16. – С. 8034.
7. Robles-Velasco A. et al. Artificial neural networks to forecast failures in water supply pipes //Sustainability. – 2021. – Т. 13. – №. 15. – С. 8226.
8. Onukwugha C. G., Osegi E. N. An Integrative Systems Model for Oil and Gas Pipeline Data Prediction and Monitoring Using a Machine Intelligence and Sequence Learning Neural Technique. – 2018.
9. Liu W., Xie Z., Song Z. Predicting Water Pipe Failures Using Deep Learning Algorithms //Journal of Infrastructure Systems. – 2023. – Т. 29. – №. 3. – С. 04023022.
10. Phan H. C. et al. Managing water main breaks in distribution networks—A risk-based decision making //Reliability Engineering & System Safety. – 2019. – Т. 191. – С. 106581.
11. Lalle Y. et al. Communication technologies for Smart Water Grid applications: Overview, opportunities, and research directions //Computer Networks. – 2021. – Т. 190. – С. 107940.
12. Мусаев, Т.А., Использование интеллектуальных систем учета электрической энергии в целях повышения эффективности процесса тарифообразования / Т. А. Мусаев, О.В. Федоров, Р.Н. Камалиев, А.А. Капанский // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2020. – № 2. – С. 68–75.
13. Fedorov O. V. Expedient forecasting of power consumption //2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – IEEE, 2017. – С. 1-4.
14. Moroz, D., Hruntovich, N., Kapanski, A., Shenets, Y., Malashanka, M., & Gracheva, E. (2020). Using models of energy consumption from influencing factors to assess the current state and energy efficiency forecasting. In E3S Web of Conferences (Vol. 220, p. 01024). EDP Sciences.
15. Martínez Alzamora F. et al. Digital twins—a new paradigm for water supply and distribution networks //HydroLink Magazine. – 2021. – Т. 2. – С. 48-54.
16. Нечеткие технологии в системах управления подъемно-транспортными механизмами / А. В. Синюков, Т. В. Синюкова, Э. Ю. Абдуллазянов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2023. – Т. 25, № 1. – С. 105-117. – DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-1-105-117. – EDN FARBJL.
17. Zyrianoff I. et al. Scalability of an Internet of Things platform for smart water management for agriculture //2018 23rd conference of open innovations association (FRUCT). – IEEE, 2018. – С. 432-439.
18. Chowdury M. S. U. et al. IoT based real-time river water quality monitoring system //Procedia Computer Science. – 2019. – Т. 155. – С. 161-168.
19. Gopavanitha K., Nagaraju S. A low cost system for real time water quality monitoring and controlling using IoT //2017 International conference on energy, communication, data analytics and soft computing (ICECDS). – IEEE, 2017. – С. 3227-3229.
20. Liu Y. T. et al. A solar powered long range real-time water quality monitoring system by LoRaWAN //2018 27th Wireless and Optical Communication Conference (WOCC). – IEEE, 2018. – С. 1-2.

21. Khutsoane O., Isong B., Abu-Mahfouz A. M. IoT devices and applications based on LoRa/LoRaWAN //IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – IEEE, 2017. – С. 6107-6112.
22. Tolentino L. K. et al. IoT-Based automated water monitoring and correcting modular device via LoRaWAN for aquaculture //International Journal of Computing and Digital Systems. – 2021. – Т. 10. – С. 533-544.
23. Регистрация ключевых параметров технологических процессов в реальном времени на базе технологии LoRaWAN . – Режим доступа [https://iice.by/solutions\\_products/lorawan/](https://iice.by/solutions_products/lorawan/) – Дата доступа: 16.10.2023.
24. Hunkeler U., Truong H. L., Stanford-Clark A. MQTT-S – A publish/subscribe protocol for Wireless Sensor Networks //2008 3rd International Conference on Communication Systems Software and Middleware and Workshops (COMSWARE'08). – IEEE, 2008. – С. 791-798.
25. Naik N. Choice of effective messaging protocols for IoT systems: MQTT, CoAP, AMQP and HTTP //2017 IEEE international systems engineering symposium (ISSE). – IEEE, 2017. – С. 1-7.
26. Thangavel D. et al. Performance evaluation of MQTT and CoAP via a common middleware //2014 IEEE ninth international conference on intelligent sensors, sensor networks and information processing (ISSNIP). – IEEE, 2014. – С. 1-6.
27. О Компании ООО «Вега-Абсолют. – Режим доступа <https://vega-absolute.ru/manufacture/> – Дата доступа: 16.10.2023.
28. О компании TELEOFIS . – Режим доступа [https:// teleofis.ru/about/](https://teleofis.ru/about/) – Дата доступа: 16.10.2023.
- 29 An open source MQTT broker. – Режим доступа <https://mosquitto.org/> – Дата доступа: 16.10.2023.

#### Авторы публикации

**Капанский Алексей Александрович** – канд. техн. наук., доцент энергетического факультета «Электроснабжение», Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого. ORCID: 0000-0003-2902-2695. Email: kapanski@mail.ru.

#### References

1. Ezechi C. G., Okoroafor E. R. *Integration of Artificial Intelligence with Economical Analysis on the Development of Natural Gas in Nigeria; Focusing on Mitigating Gas Pipeline Leakages* //SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition. – SPE, 2023. – С. D031S018R004.
2. Liu W., Chen Z., Hu Y. *Failure Pressure Prediction of Defective Pipeline Using Finite Element Method and Machine Learning Models* //SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – OnePetro, 2022.
3. Fan X. et al. *Machine learning based water pipe failure prediction: The effects of engineering, geology, climate and socio-economic factors* //Reliability Engineering & System Safety. – 2022. – Т. 219. – С. 108185.
4. Sourabh N., Timbadiya P. V., Patel P. L. *Leak detection in water distribution network using machine learning techniques* //ISH Journal of Hydraulic Engineering. – 2023. – С. 1-19.
5. Momeni A., Piratla K. R. *Prediction of Water Pipeline Condition Parameters Using Artificial Neural Networks* //Pipelines 2022. – 2022. – С. 21-29.
6. Tsai Y. L. et al. *Using convolutional neural networks in the development of a water pipe leakage and location identification system* //Applied Sciences. – 2022. – Т. 12. – №. 16. – С. 8034.
7. Robles-Velasco A. et al. *Artificial neural networks to forecast failures in water supply pipes* //Sustainability. – 2021. – Т. 13. – №. 15. – С. 8226.
8. Onukwugha C. G., Osegi E. N. *An Integrative Systems Model for Oil and Gas Pipeline Data Prediction and Monitoring Using a Machine Intelligence and Sequence Learning Neural Technique*. – 2018.
9. Liu W., Xie Z., Song Z. *Predicting Water Pipe Failures Using Deep Learning Algorithms* //Journal of Infrastructure Systems. – 2023. – Т. 29. – №. 3. – С. 04023022.
10. Phan H. C. et al. *Managing water main breaks in distribution networks—A risk-based decision making* //Reliability Engineering & System Safety. – 2019. – Т. 191. – С. 106581.
11. Lalle Y. et al. *Communication technologies for Smart Water Grid applications: Overview,*

*opportunities, and research directions* //Computer Networks. – 2021. – Т. 190. – С. 107940.

12. Musaev, T.A., *The use of intelligent electrical energy metering systems to increase the efficiency of the tariff setting process* / T. A. Musaev, O.V. Fedorov, R.N. Kamaliev, A.A. Kapansky // Vestn. Gomel. state tech. University named after P. O. Sukhoi. – 2020. – No. 2. – P. 68–75..

13. Fedorov O. V. *Expeditious forecasting of power consumption* //2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – IEEE, 2017. – С. 1-4.

14. Moroz, D., Hruntovich, N., Kapanski, A., Shenets, Y., Malashanka, M., & Gracheva, E. (2020). *Using models of energy consumption from influencing factors to assess the current state and energy efficiency forecasting*. In E3S Web of Conferences (Vol. 220, p. 01024). EDP Sciences.

15. Martínez Alzamora F. et al. *Digital twins-a new paradigm for water supply and distribution networks* //HydroLink Magazine. – 2021. – Т. 2. – С. 48-54.

16. *Fuzzy technologies in control systems for lifting and transport mechanisms* / A. V. Sinyukov, T. V. Sinyukova, E. Yu. Abdullazyanov [etc.] // News of higher educational institutions. Energy problems. – 2023. – Т. 25, No. 1. – P. 105-117. – DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-1-105-117. – EDN FARBJL.

17. Zyrianoff I. et al. *Scalability of an Internet of Things platform for smart water management for agriculture* //2018 23rd conference of open innovations association (FRUCT). – IEEE, 2018. – С. 432-439.

18. Chowdury M. S. U. et al. *IoT based real-time river water quality monitoring system* //Procedia Computer Science. – 2019. – Т. 155. – С. 161-168.

19. Gopavanitha K., Nagaraju S. *A low cost system for real time water quality monitoring and controlling using IoT* //2017 International conference on energy, communication, data analytics and soft computing (ICECDS). – IEEE, 2017. – С. 3227-3229.

20. Liu Y. T. et al. *A solar powered long range real-time water quality monitoring system by LoRaWAN* //2018 27th Wireless and Optical Communication Conference (WOCC). – IEEE, 2018. – С. 1-2.

21. Khutsoane O., Isong B., Abu-Mahfouz A. M. *IoT devices and applications based on LoRa/LoRaWAN* //IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – IEEE, 2017. – С. 6107-6112.

22. Tolentino L. K. et al. *IoT-Based automated water monitoring and correcting modular device via LoRaWAN for aquaculture* //International Journal of Computing and Digital Systems. – 2021. – Т. 10. – С. 533-544.

23. *Registration of key parameters of technological processes in real time based on LoRaWAN technology*. – Access mode [https://iice.by/solutions\\_products/lorawan/](https://iice.by/solutions_products/lorawan/) – Access date: 10/16/2023.

24. Hunkeler U., Truong H. L., Stanford-Clark A. *MQTT-S – A publish/subscribe protocol for Wireless Sensor Networks* //2008 3rd International Conference on Communication Systems Software and Middleware and Workshops (COMSWARE'08). – IEEE, 2008. – С. 791-798.

25. Naik N. *Choice of effective messaging protocols for IoT systems: MQTT, CoAP, AMQP and HTTP* //2017 IEEE international systems engineering symposium (ISSE). – IEEE, 2017. – С. 1-7.

26. Thangavel D. et al. *Performance evaluation of MQTT and CoAP via a common middleware* //2014 IEEE ninth international conference on intelligent sensors, sensor networks and information processing (ISSNIP). – IEEE, 2014. – С. 1-6.

27. *About the Company Vega-Absolut LLC*. – Access mode <https://vega-absolute.ru/manufacture/> – Access date: 10.16.2023.

28. *About TELEOFIS company*. – Access mode [https:// teleofis.ru/about/](https://teleofis.ru/about/) – Access date: 10/16/2023.

29 *An open source MQTT broker*. – Access mode [https:// https://mosquitto.org/](https://mosquitto.org/) – Access date: 16.10.2023.

### Authors of the publication

**Aliaksey A. Kapanski** – Ph.D. tech. Sci., Associate Professor, Department of Power Supply, Gomel State Technical University. BY. Sukhoi, kapanski@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2902-2695

*Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки)*

***Получено***

***12.02.2024 г.***

***Отредактировано***

***11.03.2024 г.***

***Принято***

***20.03.2024 г.***