

УДК 621.311

<https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-82-98>

## КЛЮЧЕВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И МИРОВЫЕ ПРАКТИКИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

**А. А. КАПАНСКИЙ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

*Представлен обзор современных исследований и практических разработок в области повышения эффективности и надежности систем водоснабжения. Анализ охватывает как микроуровень, включающий оптимизацию работы отдельных компонентов системы, так и макроуровень, связанный с управлением и оптимизацией работы системы водоснабжения в целом. Особое внимание уделено вопросам повышения эффективности насосных агрегатов, управлению утечками и потерями напора, а также оптимизации процессов очистки воды. На макроуровне рассмотрены стратегии оптимального распределения воды между водозаборами, изучены зоны влияния водозаборов на гидравлическую сеть, дана характеристика динамического планирования давления и управления электропотреблением насосных станций. Подчеркнута значимость систем мониторинга и диагностики для повышения надежности систем водоснабжения. Выявлены ключевые направления исследований и актуальные проблемы, а также предложены перспективные подходы к улучшению управления городскими системами водоснабжения.*

**Ключевые слова:** эффективность водоснабжения, насосные агрегаты, утечки воды, оптимизация водоснабжения, мониторинг и диагностика, управление давлением, электропотребление, искусственный интеллект, IoT-технологии.

**Для цитирования.** Капанский, А. А. Ключевые направления и мировые практики повышения эффективности и надежности водоснабжения / А. А. Капанский // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2024. – № 1 (96). – С. 82–98. <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-82-98>

## KEY DIRECTIONS AND GLOBAL PRACTICES OF EFFICIENCY AND RELIABILITY IMPROVEMENT OF WATER SUPPLY

**A. A. KAPANSKY**

*Sukhoi State Technical University of Gomel,  
the Republic of Belarus*

*The article reviews modern research and practical developments in the field of increasing the efficiency and reliability of water supply systems. The analysis covers both the micro level, which includes optimizing the operation of individual components of the system, and the macro level, related to the management and optimization of the water supply system as a whole. Particular attention is paid to improving the efficiency of pumping units, leaks and pressure losses management, as well as water treatment processes optimization. At the macro level, the article presents a review of strategies for the optimal distribution of water between water intakes, a study of the zones of water intakes influence on the hydraulic network, dynamic pressure planning and power consumption management of pumping stations. The importance of monitoring and diagnostics systems for increasing the reliability of water supply systems is emphasized. Key areas of research and current problems are identified, and promising approaches to improving the management of urban water supply systems are proposed.*

**Keywords:** water supply efficiency, pumping units, water leaks, water supply optimization, monitoring and diagnostics, pressure control, power consumption, artificial intelligence, IoT technologies.

**For citation.** Kapansky A. A. Key directions and global practices of efficiency and reliability improvement of water supply. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2024, no. 1 (96), pp. 82–98 (in Russian). <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-1-82-98>

### **Введение**

В современном мире системы водоснабжения в крупных городах представляют собой высокоорганизованные и сложные структуры, направленные на обеспечение непрерывной и эффективной подачи питьевой воды к потребителям. Эти системы, как показывают научные исследования, функционируют как многоуровневые комплексы, которые адаптируются к широкому спектру изменяющихся задач и внешних воздействий [1, 2]. В условиях растущей глобализации и урбанизации вопрос обеспечения надежного и эффективного водоснабжения населенных пунктов приобретает особую актуальность. В этих условиях спектр основных задач, определяющих стратегии развития водоканалов, включает в себя не только обеспечение экономичности технологических процессов, но и соблюдение стандартов качества воды, поддержание нормативного давления в сетях, минимизацию утечек, снижение рисков аварий и производственных сбоев.

Мировые тенденции развития централизованных систем водоснабжения направлены на постоянную модернизацию и обновление существующих сетей, внедрение энергоэффективного оборудования и применение современных информационно-аналитических технологий, включая методы искусственного интеллекта и продвинутые алгоритмы оптимизации. Комплекс этих задач способствует повышению надежности систем водоснабжения, что крайне важно для обеспечения непрерывного доступа к питьевой воде нормативного качества.

Поскольку проблематика водоснабжения охватывает целый ряд различного рода вопросов, существует множество подходов и решений, которые на данный момент не имеют единой систематизации. Это создает необходимость в комплексном анализе различных стратегий и мировых практик, позволяющих повысить эффективность и надежность систем водоснабжения. Важно понимать, что каждое решение должно учитывать как технические, так и экономические аспекты, а также быть адаптировано к конкретным условиям и особенностям водоканалов. В этом контексте данное исследование представляет собой попытку систематизировать существующие методы и подходы, а также выявить наиболее перспективные направления для будущих исследований.

Целью настоящей работы является выявление и анализ современных стратегий и подходов, направленных на повышение эффективности и надежности систем водоснабжения. Это включает в себя изучение последних разработок в области энергосберегающих технологий и инновационных методов оптимизации работы водопроводных сетей. Особое внимание уделяется анализу примеров из практик водоканалов Беларуси, что позволяет оценить реальный опыт внедрения и адаптации современных технологий в условиях конкретной страны. Представлен всесторонний обзор существующих и потенциально возможных решений в области управления системами водоснабжения, что актуально как для ученых, так и для специалистов, работающих в данной сфере.

Научная значимость публикации заключается в комплексном анализе и систематизации современных подходов и технологий в вопросах повышения эффективности и надежности водоснабжения. Практическая значимость обусловлена возможностью использования полученных результатов для масштабирования опыта на региональном и национальном уровнях. Особое внимание уделяется аспектам устойчивости систем водоснабжения к различным внешним воздействиям, что является критически важным для обеспечения бесперебойного доступа к питьевой воде.

### Материалы и методы

В рамках анализа городского водоснабжения важно учитывать всю сложность и многоуровневость технологии, включающей водозаборные сооружения, насосные станции первого и второго подъема, установки водоподготовки, резервуары чистой воды, повысительные насосные станции и водопроводные сети. Каждая из этих подсистем вносит свой вклад в общую эффективность и устойчивость системы водоснабжения, требуя индивидуального подхода к анализу, управлению и оптимизации. При исследовании отдельных элементов системы водоснабжения необходимо учитывать не только применяемые в мировой практике технические аспекты, но и вопросы экономичности, надежности и бесперебойности транспортировки воды.

В процессе подготовки данной публикации был проведен тщательный анализ научной литературы, охватывающий современные стратегии повышения энергоэффективности и бесперебойности водоснабжения. Исследование основывалось на данных крупных научных баз, таких как eLibrary.ru, Scopus и Google Академия, с использованием продвинутых поисковых стратегий. Процесс отбора литературы включал анализ научной актуальности, методологической строгости и цитируемости публикаций. Такой подход позволил выделить наиболее значимые и актуальные статьи, имеющие научную ценность в предметной области исследования.

В контексте анализа системы городского водоснабжения подходы к повышению эффективности целесообразно разделить на микро- и макроуровни. На микроуровне акцент делается на исследовании режимов работы отдельных насосов и оборудования и состоит из детального анализа эффективности каждого компонента системы, включая такие характеристики, как производительность, давление, общие и удельные расходы электропотребления. На макроуровне исследуются системные свойства водоснабжения, учитывающие вопросы прогнозирования и управления электропотреблением [3], кластеризации режимом потребления воды и оптимизации работы всей сети в целом [4].

Для каждой стадии подъема воды (первого и второго подъемов, а также повысительных насосных станций) необходимо изучение современных путей повышения эффективности, апробированных в практических условиях. Так, для одиночных районных скважин в практике водоснабжения широкое применение находит частотное регулирование производительности насоса, что отражается в многочисленных исследованиях [5, 6]. Простота монтажа оборудования позволяет не только оптимизировать потребление электроэнергии, но и увеличить срок службы оборудования, так как регулирование частоты вращения рабочего колеса насоса способствует снижению его износа [7].

Структура водоканалов часто определяется как группами скважин в рамках водозаборов, так и отдельными скважинами населенных пунктов, обеспечивающими водоснабжение через водонапорные башни. Эта конфигурация позволяет гибко управлять водными ресурсами, обеспечивая надежное водоснабжение потребителей, удаленных от централизованных систем. Одной из альтернатив повышения эффективности таких объектов является применение двигателей на постоянных магнитах. Так, группа ученых Уральского федерального университета провела сравнительный анализ энергетических потерь в электроприводах насосов с регулируемой скоростью работы для асинхронных и синхронных двигателей, представленный в статье [8]. Авторами выполнено обширное моделирование и ряд экспериментов, доказав, что при работе двигателей в повторно-кратковременном режиме общий коэффициент полезного действия насоса с синхронным приводом на 7,9–11,5 % выше, чем с асинхронным.

Следует отметить, что модернизация скважин с помощью синхронных двигателей привела к заметному улучшению общей эффективности на ряде объектах водоснабжения Беларуси. Наглядный пример внедрения эффективных технологий – деятельность в сфере энергосбережения руководства водоканала г. Жлобина, в результате которого произведена замена главного скважинного насоса на водозаборе «Лебедевский» с установкой синхронного двигателя на постоянных магнитах мощностью 32 кВт. Подтвержденный экономический эффект способствовал дальнейшей замене большей части скважин Жлобинского района на двигатели энергоэффективных серий, используя насосное оборудование от ОАО «Завод Промбурвод», известное своими инновационными решениями в данной области.

Несмотря на значительные успехи в автоматизации насосных систем и внедрении высокоэффективных приводов, в сфере водоснабжения остаются актуальными некоторые нерешенные задачи. Одной из ключевых является разработка методов оценки потенциала энергосбережения насосных установок, работающих на водонапорные башни. Исследования показывают, что во многих случаях насосы поднимают воду, создавая избыточный напор, который фактически превышает необходимый для нормальной эксплуатации системы [9]. Оптимизация частоты работы насоса, отличной от стандартных 50 Гц, на основе расчетов подъема воды может значительно снизить энергопотребление. Кроме того, использование частотно-регулируемых приводов сокращает затраты за счет обеспечения плавности пуска насосов, что, в свою очередь, снижает механические нагрузки на оборудование и обеспечивает предотвращение гидравлических ударов в системе. Вместе с этим при снижении давления необходимо учитывать уменьшение производительности насоса, что требует разработки алгоритма для правильной настройки регулятора давления, который будет балансировать между минимизацией электропотребления и удовлетворением потребностей в воде.

В вопросе повышения эффективности водоснабжения особое внимание уделяется снижению потерь напора в трубах и уменьшению утечек воды. Недавние исследования в этой области представляют большой интерес. Статья А. Абу-Махфуза и соавторов [10] вносит весомый вклад в область управления водными ресурсами, особенно в контексте снижения потерь питьевой воды. Основной акцент в исследовании делается на разработке реальной динамической модели гидравлики водоснабжения. Эта модель фокусируется на трех основных компонентах: обнаружении фоновых утечек, управлении давлением и прогнозировании потребности в воде. Авторы предложили алгоритм, который позволяет локализовать потенциально критические узлы или трубы с высоким уровнем утечек в сети. Это дает возможность проводить целенаправленное управление давлением в этих местах, что оказывает значительное влияние на эффективность водоснабжения.

Сотрудники департамента искусственной среды университета Аалто в Финляндии, С. Ахопелто и Р. Вахала в своей статье [11] представили анализ затрат и выгод от различных методов сокращения утечек воды, включая зонирование счетчиков, снижение давления и реновацию труб. Они пришли к выводу, что предпринимаемые меры для управления потерями воды не всегда являются экономически выгодными для коммунальных предприятий с умеренным уровнем утечек в сетях водоснабжения. В контексте этого исследования интересной является работа китайского ученого П. Ченга, опубликованная в 2021 г. [12]. В этой публикации приводятся результаты анализа влияния изменений давления в различных диаметрах труб на снижение утечек в системе распределения воды. Работа П. Ченга дополняет исследование Ахопелто и Вахала, предоставляя более глубокое понимание того, как изменения давле-

ния в трубопроводах могут влиять на величину потерь, что становится важным фактором в оптимизации работы систем водоснабжения и выборе экономически оправданных стратегий по модернизации трубопроводной сети.

В Беларуси частные компании активно работают над усовершенствованием систем диагностики водоснабжения, что находит отражение в проекте «Акватория» фирмы ООО «Техникон». Согласно информации из открытых источников [13], одним из применяемых методов диагностики утечек является анализ ночных расходов воды на протяжении длительного времени и их сравнение с базовыми показателями. Любое отклонение от базового уровня расхода рассматривается как индикатор потенциальной утечки. Кроме того, для повышения надежности водоснабжения используются генетические алгоритмы в диагностике насосов. Еще один важный аспект диагностики – проверка обратных клапанов, что также способствует повышению эффективности системы. Стоит отметить, что публикации, описывающие использование этих алгоритмов в деталях, в открытом доступе отсутствуют. Это указывает на потенциальную уникальность и инновационность применяемых методов, а также на необходимость дальнейшего изучения этой области.

Исследования эффективности отдельных скважин неизбежно приводят к анализу путей повышения эффективности и для группы насосов, которые объединяют скважины в единую сеть. Это позволяет переходить от изолированного рассмотрения отдельного объекта к пониманию их взаимодействия в рамках широкомасштабной схемы городского водоснабжения. Отдельные элементы формируют собственную сеть микроуровня, где взаимное влияние скважин друг на друга и вопросы их оптимизации активно исследуются в настоящее время [14].

В зарубежных источниках научные работы акцентируют внимание на важности применения алгоритмов оптимизации при управлении насосами водопроводной сети [15–17]. Широкий спектр исследований в водоснабжении включает разработку информационно-коммуникационных систем, генетических алгоритмов, нечеткой логики и методов на основе нейронных сетей [18–20]. Это способствует эффективному обнаружению утечек, снижению потерь воды и эксплуатационных расходов, улучшению качества воды и снижению общего удельного энергопотребления [16].

Водоканалы областных центров Беларуси выбирают стратегию комплексной модернизации водозаборов. Здесь ключевой особенностью является не столько замена низкоэффективного оборудования, сколько внедрение интеллектуальных систем управления водопользованием, способных самостоятельно адаптироваться к текущим условиям работы без жесткой привязки к расходно-напорным характеристикам [22]. В контексте станции первого подъема стоит обратить внимание на схему взаимосвязи водозабора «Ипуть» г. Гомеля, представленную на рис. 1. В такой системе включение насосов регулируется оператором станции в зависимости от объемов водопотребления и уровня воды накопительных резервуарах. Вместе с тем современные пути адаптивного управления насосными станциями основаны на анализе текущих потребностей в воде и его непрерывном прогнозировании.

Переменный состав включения насосов, определяемый спросом водопотребления, создает сложную целевую функцию с нелинейной эффективностью. Это подразумевает, что повышение коэффициента полезного действия одного насоса не гарантирует аналогичное улучшение общей экономичности системы микроуровня. Более того, в определенных случаях это может привести к снижению общего группового удельного расхода электроэнергии при подъеме воды, особенно, если взаимное влияние между насосами приводит к нежелательному перераспределению рабочих точек их расходно-напорных характеристик в менее эффективные зоны. Исследования, проводимые на базе Гомельского водоканала, подтверждают, что влияние одних насосов на

соседние может вызывать эффект передавливания, который отражается сильной корреляцией давлений на оголовке скважин близлежащих насосов (см. таблицу). Это подчеркивает важность комплексного подхода к управлению системой насосного оборудования.

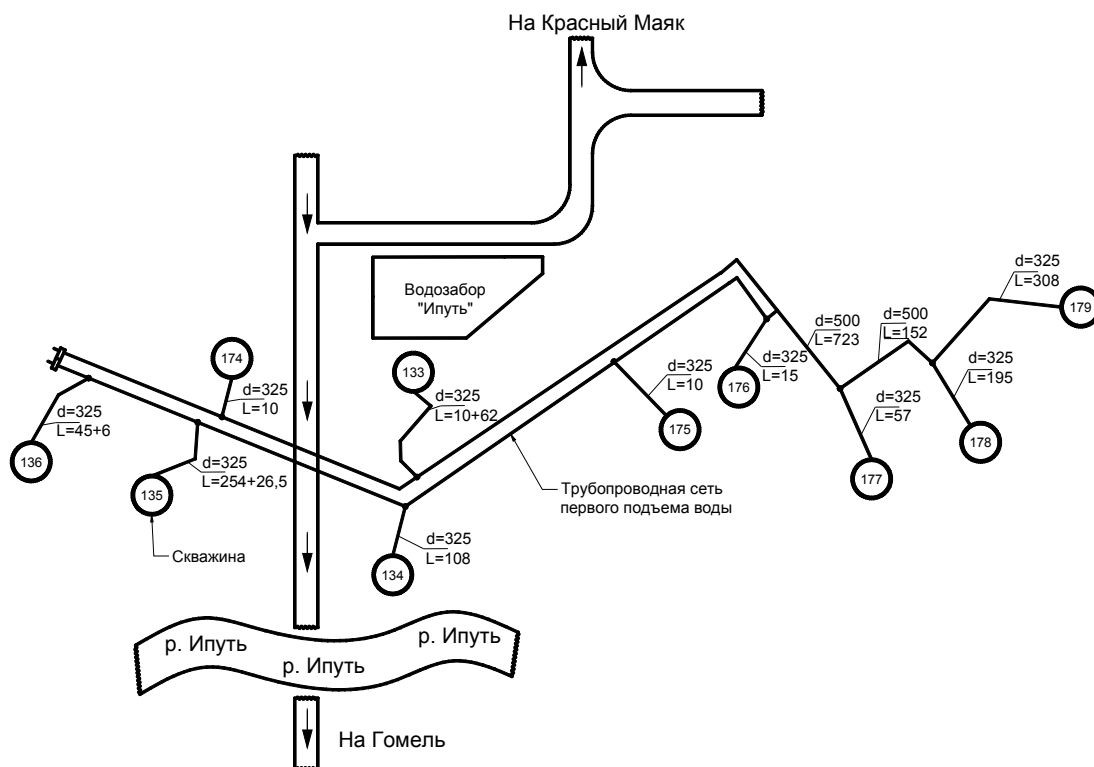


Рис. 1. Пример сети микроуровня первого подъема расположения скважин водозабора «Ипуть»

#### Оценка корреляции Пирсона для давления на оголовке между скважинами водозабора «Ипуть»

Номер скважины	133	134	135	174	175	176	178	179
133	1							
134	0,98	1						
135	0,61	0,63	1					
174	0,87	0,85	0,5	1				
175	0,6	0,62	0,3	0,55	1			
176	0,12	0,12	0,02	0,19	0,11	1		
178	0,21	0,23	0,1	0,28	0,26	0,14	1	
179	0,21	0,2	0,05	0,23	0,08	0,18	-0,43	1

В задачах оптимизации прикладного уровня особую актуальность приобретают математические модели, которые могут учитывать и предсказывать не только эффекты взаимного влияния скважин, но и различные операционные факторы, такие как изменение спроса на воду, износ оборудования и прочие эксплуатационные характеристики, включая изменяющийся динамический уровень скважины. В этом контексте особую ценность обретает полезная модель, представленная в патенте № 27710 U1 [17]. Здесь приводится детальное описание взаимодействия элементов

управления и планирования режимов работы насосов на различных уровнях подъема воды, а также схемы подключения датчиков, фиксирующих ключевые параметры гидравлической сети. Отличительной особенностью является способность модели корректировать действия запорной арматуры, тем самым регулируя производительность насосов в реальном времени, обеспечивая оптимизацию потока воды и эффективность использования ресурсов, в том числе в сложной климатической среде.

В условиях возможного промерзания трубопроводов требования к оптимизации процессов подачи воды существенно усложняются. В статье [18], посвященной повышению экономической эффективности насосных станций первого подъема в среде колеблющейся температуры окружающей среды, представлена математическая модель, которая учитывает возможность образования наледи в трубах и предлагает механизмы предотвращения таких явлений. Эта модель ориентирована на снижение затрат электроэнергии, основываясь на детальном анализе и прогнозировании различных эксплуатационных сценариев.

В данном контексте особо актуальными становятся исследования, проведенные М. Асламом, Н. Реддичарлой, А. Эльмансуром и К. Альшехи, посвященные разработке алгоритмов для раннего выявления отказов электрических погружных насосов [19], что может быть адаптировано для повышения надежности систем водоснабжения в условиях низких температур. Использование машинного обучения для прогнозирования критических параметров, таких как температура воды и давление в системе, может помочь в своевременном обнаружении и предотвращении аварий оборудования. Тестирование модели на исторических данных показало точность прогнозов на уровне 70%. Разработанные модели были внедрены для работы в реальном времени, предоставляя инженерам ежедневные прогнозы вероятности поломок.

В последние годы водный сектор столкнулся с серьезными вызовами, связанными с разработкой интеллектуальных систем водоснабжения, направленных на повышение эффективности и устойчивости сетей. Одна из ключевых сложностей в этом процессе – интеграция оборудования от различных производителей в общую цифровую платформу, что требует гибкости и совместимости систем. Здесь актуальными остаются механизмы оценки гидравлических характеристик сети в реальном времени, используя технологии быстрого монтажа IoT-устройств для сбора и передачи данных и их интеграции в систему веб-диспетчеризации. Такой подход позволяет не только эффективно управлять ресурсами, но и оперативно реагировать на изменения в системе, что критически важно в условиях экстремальных температурных колебаний, приводящих к риску промерзания трубопроводов.

Интеграция современных алгоритмов искусственного интеллекта и машинного обучения в технологический процесс водоснабжения не обходится без использования цифровых сенсоров. Это является перспективным направлением в исследованиях, особенно в условиях внезапных порывов и других нештатных ситуаций [20]. Результаты работы авторов А. Садегиуна, Н. Метье, Д. Чепмен, С. Энтони, опубликованные в 2014 г., представляют значительный интерес для разработки системы превентивных мер предупреждения аварий в гидравлике [21]. Ввиду того, что с 2009 по 2010 г. в Великобритании примерно 3281 мегалитр воды был потерян из-за неисправностей или утечек в водопроводных сетях, авторы предложили применение новой технологии измерения давления, основанной на датчике, который неинвазивно монтируется к стенке трубы с помощью зажима. Они предположили, что все трубы в той или иной степени расширяются под давлением, и поэтому возникающая контактная сила способна измеряться цифровыми устройствами и передаваться на сервер обработки данных. На основе этой силы рассчитывалось относительное изменение внутреннего давления, по отношению к которому делалась оценка возможных утечек.

Работа А. Садегиуна и его коллег [21], демонстрирующая использование интеллектуальных датчиков для измерения изменений давления в водопроводных трубах, открывает новые перспективы для исследований в этой области. Развитие дальнейшего научного направления может сосредоточиться на улучшении точности сенсорных систем, используя, к примеру, стационарные устройства с врезкой пьезоэлектрических датчиков в сеть. Это позволит значительно повысить надежность измерений и соответственно качество алгоритмов, способных анализировать полученные данные для более точного прогнозирования и локализации утечек. Кроме того, важным направлением является интеграция этих систем с облачными технологиями и интернетом вещей (IoT), что позволит обеспечить более эффективный сбор и обмен данными. Это может включать разработку мобильных приложений и платформ для оперативного информирования об аварийных ситуациях на основе механизмов прогнозирования исследуемых узлов системы водоснабжения.

В рамках анализа систем водоснабжения особое внимание уделяется не только обеспечению эффективности и надежности транспортировки воды, но и поддержанию ее высокого качества. Это требует применения современных технологий очистки и фильтрации, способных эффективно удалять загрязнения и обеспечивать безопасность воды для потребителей. Классические схемы обезжелезивания воды предусматривают методы упрощенной аэрации с использованием кварцевого песка в качестве загрузки фильтров. В свою очередь, современные исследования фокусируются на использовании металлического железа [22], плавающих гранулированных наполнителей из расширенного полистирола [23] или применении гравитационных аэрационных башен для поднятия уровня растворенного кислорода и эффективного удаления железа [24].

Для повышения экономичности очистки воды особое внимание уделяется оптимизации процессов обезжелезивания. Одним из ключевых аспектов является своевременная замена фильтрующего материала, приводящая к увеличению фильтроцикла в 2–3 раза [25]. Это значительно снижает затраты на промывку фильтров и повышает экономическую эффективность процесса водоочистки. Примером эффективности таких мер является опыт водозаборов г. Гомеля, где периодичность промывки фильтров варьируется в зависимости от различных факторов. Фильтроцикл связан как с уровнем содержания железа в сырой воде, так и со скоростью фильтрации на различных водозаборах. В результате периодичность промывки может колебаться от 24 до 72 ч, что позволяет оптимизировать процесс в соответствии с конкретными требованиями каждого водозабора.

Исходя из обозначенных аспектов, одним из важных направлений исследований могут стать современные методы оценки оптимального времени фильтроцикла. Здесь должны учитываться индивидуальные подходы к управлению процессами очистки, а также разнообразные факторы, влияющие на эффективность фильтрации. В этом контексте классические методы дисперсионного анализа могут быть применены для определения оценки значимости фильтроцикла и влияния объемов промывной воды на качество очистки [26]. Такой подход требует разработки алгоритмов, которые позволят отслеживать ежедневные изменения содержания железа на выходе из фильтров. Это обеспечит возможность прогнозирования необходимости своевременной замены фильтрующих материалов, что способствует повышению общей эффективности процесса очистки воды.

В сфере улучшения эффективности городских систем водоснабжения на макроуровне было проведено множество значимых исследований, среди которых выделяется работа А. Джемилогла и его коллег [27]. В этой публикации особое внимание



уделяется оптимизации управления давлением в сетях, что демонстрирует эффективность использования метаэвристического алгоритма для снижения утечек воды. Результаты показывают значительное улучшение среднего давления в сети, что, в свою очередь, важно для системной оценки износа элементов водоснабжения. Со своей стороны, исследование М. Вафаи [28] подчеркивает значимость использования методов динамической симуляции для планирования оптимального времени замены трубопроводов. Представленное исследование дает понимание того, как замена сети водоснабжения может влиять на формирование цен на воду, подчеркивая взаимосвязь между техническим обслуживанием инфраструктуры и экономическими аспектами управления водоснабжением.

Оптимизация давления в системе водоснабжения играет ключевую роль в повышении общей эффективности работы водоканалов, открывая значительный потенциал для энергосбережения. Для точной оценки этого потенциала необходимо применение современных научных подходов и знаний. В системах, состоящих из множества водозаборов, часто возникает проблема избыточного давления, приводящего к неоправданным потерям. В этом контексте в работе О. Матвиенко и П. Спичак [29] исследуется данная область управления давлением. Авторы рассматривают использование стохастической модели квазистационарных режимов водоснабжения для снижения избыточного давления в сети. Они предлагают метод оптимального зонирования водопроводных сетей, который включает выделение изолированных зон с избыточным давлением и расчет параметров регуляторов давления. Результаты показывают, что зонирование и установка регуляторов давления могут снизить общее избыточное давление в сети на 21 %, повышая тем самым эффективность работы системы.

Аналогично, статья А. Абу-Махфуза и соавторов [10] также решает проблему управления давлением в системах водоснабжения. Авторы описывают новые алгоритмы для точного управления давлением, используя клапаны управления давлением или насосы с переменной скоростью, что способствует снижению уровня утечек. Они также разработали модель прогнозирования потребности в воде, учитывающую колебания спроса и анализирующую утечки на различных временных периодах, что позволяет более точно прогнозировать потребности в воде и связанную с ними неопределенность.

Несмотря на значительные достижения в этих областях, остается ряд нерешенных задач, где одной из ключевых является разработка механизма планирования графиков давления на водозаборах с позиции эффективности, учитывающего влияние каждого водозабора на диктующие точки сети водоснабжения. Для оптимизации сети водоснабжения можно использовать математические модели, которые предварительно должны учитывать кластеры потребления воды и удельные показатели. Эти аспекты могут стать частью будущих исследований, направленных на улучшение управления городскими системами водоснабжения.

### **Результаты и обсуждения**

В рамках нашей научной работы проведен всесторонний анализ современных научных работ и практических решений в сфере водоснабжения. Особое внимание уделено комплексному подходу, охватывающему как детальное изучение отдельных элементов системы водоснабжения (микроуровень), так и стратегическое планирование и оптимизацию работы системы в целом (макроуровень). Указанный подход позволяет не только выявить ключевые направления и актуальные проблемы в данной области, но и определить наиболее перспективные стратегии повышения эффективности и надежности водоснабжения городских систем водоснабжения.

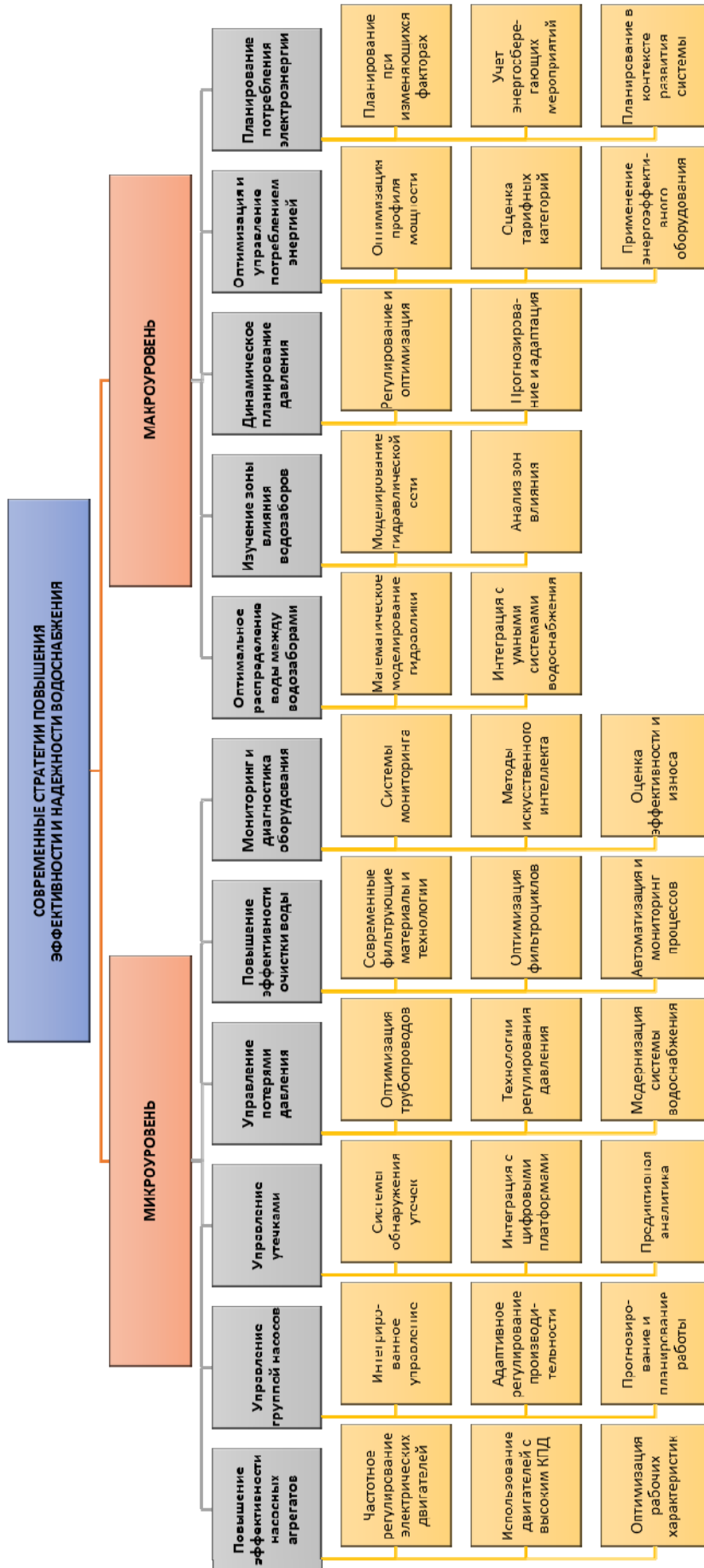


Рис. 2. Современные стратегии повышения эффективности и надежности водоснабжения

На рис. 2 в виде диаграммы систематизированы и показаны основные направления и стратегии повышения эффективности и надежности системы водоснабжения. В рамках микроуровня отмеченные направления включают несколько ключевых аспектов:

1. *Повышение эффективности одиночных насосных агрегатов*: здесь акцентируется внимание на внедрении систем частотного регулирования электроприводов, использовании высокоэффективных двигателей и оптимизацию рабочих характеристик насосов. Эти меры направлены на адаптацию работы насосов к изменяющимся условиям эксплуатации и интеграцию систем мониторинга для оптимизации их работы в реальном времени.

2. *Управление группой насосных агрегатов*: учитывает интегрированное управление и автоматическую настройку работы насосов, а также адаптивное регулирование их производительности. Это включает в себя использование частотно-регулируемых приводов и разработку моделей прогнозирования потребности в воде для эффективного планирования работы насосных станций.

3. *Управление утечками*: ключевыми элементами этого аспекта являются разработка и внедрение систем обнаружения утечек, интеграция этих систем с цифровыми платформами для оперативного реагирования, а также применение предиктивной аналитики для профилактики утечек.

4. *Управление потерями давления*: включает в себя вопросы оптимизации конструкции и материалов трубопроводов, применение технологий регулирования давления, а также модернизацию системы водоснабжения с целью снижения избыточного давления и улучшения контроля состояния сети.

5. *Повышение эффективности очистки воды*: основное внимание уделяется использованию современных фильтрующих материалов, оптимизации фильтроциклов и автоматизации процессов очистки, включая непрерывный контроль качества воды и эффективности очистных процессов.

6. *Мониторинг и диагностика состояния оборудования*: охватывает вопросы разработки и внедрения систем мониторинга с использованием датчиков и IoT-технологий, применение методов искусственного интеллекта для анализа данных и предиктивной аналитики для прогнозирования технического обслуживания и замены компонентов оборудования.

На макроуровне в системах водоснабжения акцент делается на оптимизацию работы всей системы, включая управление распределением воды, динамическое планирование, энергоэффективность и создание инфраструктуры мониторинга. Эти направления представлены следующими элементами:

1. *Оптимальное распределение воды между водозаборами*: представлено математическим моделированием и оптимизацией для эффективного распределения водных ресурсов, учетом гидравлических особенностей сети для определения оптимального распределения воды и интеграцией с системами умного водоснабжения, включая технологии Интернета вещей и умные сенсоры.

2. *Изучение зоны влияния водозаборов на гидравлическую сеть*: включает моделирование гидравлической сети и создание цифровых двойников для анализа потоков воды и определение зон влияния каждого водозабора, а также исследование взаимодействия между водозаборами и их влияния на стабильность и эффективность работы системы.

3. *Динамическое планирование давления водозаборов*: связано с регулированием и оптимизацией давления с использованием автоматизированных систем управления, прогнозированием и адаптацией уровня давления к текущим и предполагаемым потребностям системы.

4. *Оптимизация и управление электропотреблением*: охватывает оптимизацию использования электроэнергии, оценку тарифных категорий для выбора наиболее выгодных планов оплаты электроэнергии и применение энергоэффективного оборудования и технологий.

5. *Планирование электропотребления*: отражает планирование в условиях изменяющихся влияющих факторов, включая сезонные и временные колебания в потреблении воды, планирование с учетом энергосберегающих мероприятий и планирование в контексте будущего развития системы водоснабжения.

Особое место в анализе направлений повышения эффективности водоснабжения занимают системы мониторинга, предназначенные для непрерывного отслеживания состояния гидравлической сети и оперативного реагирования на изменения. Эти системы способны адаптироваться как на микро-, так и на макроуровне, обеспечивая повышение эффективности работы отдельных водозаборов и системы водоснабжения в целом. Их внедрение позволяет не только оптимизировать работу каждого компонента системы, но и гармонизировать взаимодействие между различными элементами инфраструктуры, что в конечном итоге способствует повышению надежности и устойчивости общей системы водоснабжения.

### **Заключение**

В заключение проведенного анализа современных исследований и практик в области водоснабжения можно отметить, что повышение эффективности и надежности систем на микро- и макроуровнях требует комплексного подхода и интеграции различных технологий и методик. На микроуровне важно сосредоточиться на оптимизации работы отдельных компонентов системы, таких как насосные агрегаты, трубопроводные сети и технологии очистки. В то же время на макроуровне ключевыми моментами являются разработка стратегий оптимального распределения воды между водозаборами, изучение зон влияния водозаборов на гидравлическую сеть, динамическое планирование давления и эффективное управление электропотреблением.

Системы мониторинга играют важную роль в обеспечении непрерывного контроля и оперативного реагирования на изменения в системе водоснабжения. Интеграция современных алгоритмов искусственного интеллекта и машинного обучения, а также использование цифровых сенсоров и IoT-технологий открывают новые возможности для повышения эффективности и надежности систем водоснабжения.

Однако, несмотря на значительные успехи в этой области, остаются нерешенными отдельные задачи, что требует дальнейших исследований. В частности, важным направлением является разработка механизмов планирования графиков давления на водозаборах, учитывающих влияние каждого водозабора на диктующие точки сети водоснабжения, а также учет кластеров потребления воды и удельных показателей. Эти аспекты должны стать частью будущих исследований, направленных на улучшение управления городскими системами водоснабжения, снижение эксплуатационных расходов и повышение устойчивости водоснабжения.

### **Литература**

1. Грунтович, Н. В. Исследование влияния факторов на формирование удельных и общих расходов электрической энергии в технологической системе водоснабжения / Н. В. Грунтович, А. А. Капанский, О. В. Федоров // *Электротехн. системы и комплексы*. – 2016. – № 3 (32). – С. 54–59. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2016-3\(32\)-54-59](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2016-3(32)-54-59)

2. Великанов, Н. Л. Оценка энергоэффективности городских систем транспортировки и подъема воды / Н. Л. Великанов // Транспорт и сервис. – 2014. – № 2. – С. 74–82.
3. A novel approach to optimal pump scheduling in water distribution systems / A. M. Bagirov [et al.] // 14th Water Distribution Systems Analysis Conference, Adelaide, Australia, 24–27 Sept., 2012 / University of Adelaide. – Adelaide, 2012. – Vol. 1. – P. 618–631.
4. Sowby, R. B. Review of Energy Management Guidance for Water and Wastewater Utilities / R. B. Sowby, N. Morehead, S. Burdette // Energy Nexus. – 2023. – P. 100235.
5. Голыбин, Ю. А. Энергосбережение при автоматизации насосных станций / Ю. А. Голыбин, Х. Б. Юнусов // Уральская горная школа – регионам : материалы междунар. науч.-практ. конф., Екатеринбург, 6–7 апр. 2020 г. / Урал. гос. гор. ун-т. – Екатеринбург, 2020. – С. 196–197.
6. Xiangqian, X. Research on intelligent frequency conversion control system of pumping unit with auto-adapted function / X. Xiangqian, Z. Haobin, L. Mao // Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology, Harbin, Heilongjiang, China, 12–14 Aug., 2011 / Institute of Electrical and Electronics Engineer. – Harbin, 2011. – Vol. 5. – P. 2246–2248.
7. Kan, E. Methods of regulating the work of units at irrigation pumping stations / E. Kan, M. Mukhammadiev, N. Ikramov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 869, N 4. – P. 042009.
8. Efficiency analysis of low electric power drives employing induction and synchronous reluctance motors in pump applications / V. Kazakbaev [et al.] // Energies. – 2019. – Vol. 12, N 6. – P. 1144.
9. Optimization of a variable frequency drive pump working on a water tower / N. V. Hruntovich [at al.] // SES 2019 : In E3S Web of Conferences, Kazan, Russia, 18–20 Sept., 2019 / EDP Sciences. – Kazan, 2019. – Vol. 124. – P. 05060.
10. Real-time dynamic hydraulic model of water distribution networks / A. M. Abu-Mahfouz [et al.] // Water. – 2019. – Vol. 11, N 3. – P. 470.
11. Ahopelto, S. Cost-benefit analysis of leakage reduction methods in water supply networks / S. Ahopelto, R. Vahala // Water. – 2020. – Vol. 12, N 1. – P. 195.
12. Cheng, P. Leakage reduction of water distribution network system based on the observation data of water leakage and pressure of actual water distribution network system / P. Cheng // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1881, N 3. – P. 032087.
13. Aquatoria Smart Water. – Mode of access: <https://aquatoria.technikon.by/>. – Date of access: 24.12.2023.
14. Ведерникова, Ю. А. Вопросы моделирования взаимного влияния скважин / Ю. А. Ведерникова, И. Г. Соловьев // Вестн. кибернетики. – 2004. – № 3. – С. 156–162.
15. Горюнов, А. Н. Регулируемый электропривод насосных агрегатов первого подъема станций водоподготовки / А. Н. Горюнов, Г. Б. Онищенко // Вестн. Иван. гос. энергет. ун-та. – 2012. – № 6. – С. 131–134.
16. A comprehensive review on energy efficiency enhancement initiatives in centrifugal pumping system / V. K. A. Shankar [et al.] // Applied Energy. – 2016. – Vol. 181. – P. 495–513.

17. Багаев, Ю. Г. Опыт внедрения станций частотного управления насосными агрегатами / Ю. Г. Багаев, В. Ф. Мелеховский, А. П. Усачев // Водоснабжение и санитар. техника. – 2004. – № 3. – С. 9–11.
18. Studziński, J. Control of pumps of water supply network under hydraulic and energy optimisation using artificial intelligence / J. Studziński, A. Ziółkowski // Entropy. – 2020. – Vol. 22, N 9. – P. 1014.
19. Rojek, I. Detection and localization of water leaks in water nets supported by an ICT system with artificial intelligence methods as a way forward for smart cities / I. Rojek, J. Studzinski // Sustainability. – 2019. – Vol. 11, N 2. – P. 518.
20. Kougiyas, I. P. Multiobjective pump scheduling optimization using harmony search algorithm (HSA) and polyphonic HAS / I. P. Kougiyas, N. P. Theodossiou // Water resources management. – 2013. – Vol. 27. – P. 1249–1261.
21. Муравьев, А. В. Управление энергосберегающими режимами насосных установок по критерию «баланс мощности» / А. В. Муравьев, А. Г. Калинин, Т. В. Мясникова // Вестн. Чуваш. ун-та. – 2019. – № 1. – С. 75–82.
22. Волков, А. А. Интеллектуальные системы управления водопользованием / А. А. Волков // Вестн. МГСУ. – 2011. – № 1-1. – С. 287–293.
23. Система автоматического управления водоснабжением : пат. на полезную модель 27710 U1 Рос. Федерация, МПК G 01 N 35/00 / И. И. Глуховский, А. Б. Каменецкий. – № 2002122270/20 ; заявл. 22.08.02 ; опубл. 10.02.03.
24. Палкин, Г. А. Исследование оптимального метода управления электроприводами насосов первого подъема, эксплуатируемых в условиях отрицательных температур / Г. А. Палкин, А. Ф. Гайсин // Изв. вузов. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 194–208.
25. Deployment of AI/ML Based Predictive Model for Early Detection of ESP Failure / M. Aslam [et al.] // Decarbonising. Faster. Together : Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, Abu Dhabi, UAE, 2–5 Oct., 2023 / ADNOC. – Abu Dhabi, 2023. – P. D031S085R002.
26. Overview of energy management and leakage control systems for smart water grids and digital water / C. Giudicianni [et al.] // Modelling. – 2020. – Vol. 1, N 2. – P. 134–155.
27. SmartPipes: Smart wireless sensor networks for leak detection in water pipelines / A. M. Sadeghioon [et al.] // Journal of sensor and Actuator Networks. – 2014. – Vol. 3, N 1. – P. 64–78.
28. Characterizing the reactivity of metallic iron for water treatment: H<sub>2</sub> evolution in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and uranium removal efficiency / A. I. Ndé-Tchoupé [et al.] // Water. – 2020. – Vol. 12, N 6. – P. 1523.
29. Orlov, V. Energy saving in water treatment technologies with polystyrene foam filters / V. Orlov, S. Martynov, S. Kunytskiy // Journal of Water and Land Development. – 2016. – Vol. 31, N 1. – P. 119–122.
30. A Bench Model Design of Gravitational Aeration Tower System as Treatment System for Iron Removal in Groundwater / E. Z. Radzi [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 991, N 1. – P. 012099.
31. Cescon, A. Filtration process and alternative filter media material in water treatment / A. Cescon, J. Q. Jiang // Water (Switzerland). – 2020. – Vol. 12, N 12. – P. 1–20.

32. Капанский, А. А. Повышение энергетической эффективности водозаборов за счет повторного использования промывной воды и сокращения времени фильтроцикла / А. А. Капанский // Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 105–117.
33. Optimal Exploitation of Urban Water Supply Networks Based on Pressure Management with the Nondominated Sorting Differential Evolution (NSDE) Algorithm / A. Cemiloglu [et al.] // *Water*. – 2023. – Vol. 15, N 14. – P. 2583.
34. Vafae, M. Determining the Minimum Price of Drinking Water and Optimal Scheduling of Water Pipe Replacement in Urban Distribution Network / M. Vafae, H. Nozari, S. Marofi // *Journal of Water and Wastewater [Ab va Fazilab]* (in persian). – 2021. – Vol. 32, N 3. – P. 21–39.
35. Matviienko, O. Method of increasing the efficiency of the water supply network due to its zoning / O. Matviienko, P. Spichak // *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. – 2023. – N 1 (23). – P. 83–95.

### References

1. Gruntovich N. V., Kapansky A. A., Fedorov O. V. Study of the influence of factors on the formation of specific and total electrical energy consumption in the technological water supply system. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*, 2016, no. 3 (32), pp. 54–59. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2016-3\(32\)-54-59](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2016-3(32)-54-59) (in Russian).
2. Velikanov N. L. Assessing the energy efficiency of urban transportation and water lifting systems. *Transport and service*, 2014, no. 2, pp. 74–82 (in Russian).
3. Bagirov A. M., Barton A. F., Mala-Jetmarova H., Al Nuaimat A., Ahmed S. T., Sultanova N. A novel approach to optimal pump scheduling in water distribution systems. *14th Water Distribution Systems Analysis Conference*, 2012, pp. 618–631.
4. Sowby R. B., Morehead N., Burdette S. Review of Energy Management Guidance for Water and Wastewater Utilities. *Energy Nexus*, 2023, p. 100235.
5. Golybin Yu. A., Yunusov Kh. B. Energy saving in the automation of pumping stations. *Ural'skaya gornaya shkola – regionam: materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Ekaterinburg, 6–7 apr. 2020 g.* [Ural Mining School – to the regions: materials of the international scientific and practical conference, Ekaterinburg, April 6–7, 2020]. Ekaterinburg, Ural State Mining University, 2020, p. 196–197 (in Russian).
6. Xiangqian X., Haobin Z., Mao L. Research on intelligent frequency conversion control system of pumping unit with auto-adapted function. *Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*, IEEE, 2011, vol. 5, pp. 2246–2248.
7. Kan E., Mukhammadiev M., Ikramov N. Methods of regulating the work of units at irrigation pumping stations. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 869, no. 4, p. 042009.
8. Kazakbaev V., Prakht V., Dmitrievskii V., Ibrahim M. N., Oshurbekov S., Sarapulov S. Efficiency analysis of low electric power drives employing induction and synchronous reluctance motors in pump applications. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 6, p. 1144.
9. Hruntovich N. V., Kapanski A. A., Baczynski D., Vagapov G. V., Fedorov O. V. Optimization of a variable frequency drive pump working on a water tower. *In E3S Web of Conferences, Kazan, Russia, 18–20 Sept., 2019*. Kazan, 2019, vol. 124, p. 05060.

10. Abu-Mahfouz A. M., Hamam Y., Page P. R., Adedeji K. B., Anele A. O., Todini E. Real-time dynamic hydraulic model of water distribution networks. *Water*, 2019, vol. 11, no. 3, p. 470.
11. Ahopelto S., Vahala R. Cost-benefit analysis of leakage reduction methods in water supply networks. *Water*, 2020, vol. 12, no. 1, p. 195.
12. Cheng P. Leakage reduction of water distribution network system based on the observation data of water leakage and pressure of actual water distribution network system. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1881, no. 3, p. 032087.
13. Aquatoria Smart Water. Available at: <https://aquatoria.technikon.by/> (accessed 24 January 2023).
14. Vedernikova Yu. A., Solovyov I. G. Issues of modeling the mutual influence of wells. *Vestnik kibernetiki*, 2004, no. 3, p. 156–162 (in Russian).
15. Goryunov A. N., Onishchenko G. B. Adjustable electric drive of pumping units of the first rise of water treatment stations. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2012, no. 6, pp. 131–134 (in Russian).
16. Shankar V. K. A., Umashankar S., Paramasivam S., Hanigovszki N. A comprehensive review on energy efficiency enhancement initiatives in centrifugal pumping system. *Applied Energy*, 2016, vol. 181, pp. 495–513.
17. Bagaev Yu. G., Melekhovsky V. F., Usachev A. P. Experience in implementing frequency control stations for pumping units. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*, 2004, no. 3, pp. 9–11 (in Russian).
18. Studziński J., Ziółkowski A. Control of pumps of water supply network under hydraulic and energy optimization using artificial intelligence. *Entropy*, 2020, vol. 22, no. 9, p. 1014.
19. Rojek I., Studzinski J. Detection and localization of water leaks in water nets supported by an ICT system with artificial intelligence methods as a way forward for smart cities. *Sustainability*, 2019, vol. 11, no. 2, p. 518.
20. Kougiyas I. P., Theodossiou N. P. Multiobjective pump scheduling optimization using harmony search algorithm (HSA) and polyphonic HSA. *Water resources management*, 2013, vol. 27, pp. 1249–1261.
21. Muravyov A. V., Kalinin A.G., Myasnikova T. V. Control of energy-saving modes of pumping units according to the “power balance” criterion. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*, 2019, no. 1, pp. 75–82 (in Russian).
22. Volkov A. A. Intelligent water management systems. *Vestnik MGSU = Vestnik MGSU*, 2011, no. 1-1, pp. 287–293 (in Russian).
23. Glukhovskii I. I., Kamenetskii A. B. *Automatic water supply control system*. Patent Rossiiskaya Federatsiya 2002122270/20. Publ. date 10.02.03 (in Russian).
24. Palkin G. A., Gaisin A. F. Study of the optimal method for controlling electric drives of first lift pumps operated in conditions of negative temperatures. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 194–208 (in Russian).
25. Aslam M., Reddicharla N., Elmansour A., Alshehhi K., Vanam P. R., Al Dhaheri B., Al Sonbaty T. Deployment of AI/ML Based Predictive Model for Early Detection of ESP Failure. *Decarbonising. Faster. Together: Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*, Abu Dhabi, October 2–5, 2023, p. D031S085R002.



26. Giudicianni C., Herrera M., Nardo A. D., Adeyeye K., Ramos H. M. Overview of energy management and leakage control systems for smart water grids and digital water. *Modelling*, 2020, vol. 1, no. 2, pp. 134–155.
27. Sadeghioon A. M., Metj N., David N. Chapman, Carl J. Anthony. SmartPipes: Smart wireless sensor networks for leak detection in water pipelines. *Journal of sensor and Actuator Networks*, 2014, vol. 3, no. 1, pp. 64–78.
28. Ndé-Tchoupé A. I., Hu R., Gwenzu W., Nassi A., Noubactep C. Characterizing the reactivity of metallic iron for water treatment: H<sub>2</sub> evolution in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and uranium removal efficiency. *Water*, 2020, vol. 12, no. 6, p. 1523.
29. Orlov V., Martynov S., Kunytskiy S. Energy saving in water treatment technologies with polystyrene foam filters. *Journal of Water and Land Development*, 2016, vol. 31, no. 1, pp. 119–122.
30. Radzi E. Z., Wahab M. S., Sahdan M. Z., Hamdan R., Madun A., Zakariah R. A. A Bench Model Design of Gravitational Aeration Tower System as Treatment System for Iron Removal in Groundwater. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 991, no. 1, p. 012099.
31. Cescon A., Jiang J. Q. Filtration process and alternative filter media material in water treatment. *Water (Switzerland)*, 2020, vol. 12, no. 12, pp. 1–20.
32. Kapansky A. A. Increasing the energy efficiency of water intakes by reusing wash water and reducing the filter cycle time. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 105–117 (in Russian).
33. Cemiloglu A., Licai Z., Ugurenver A., Nanekaran Y. A. Optimal Exploitation of Urban Water Supply Networks Based on Pressure Management with the Nondominated Sorting Differential Evolution (NSDE) Algorithm. *Water*, 2023, vol. 15, no. 14, p. 2583.
34. Vafae M., Nozari H., Marofi S. Determining the Minimum Price of Drinking Water and Optimal Scheduling of Water Pipe Replacement in Urban Distribution Network. *Journal of Water and Wastewater; Ab va Fazilab (in Persian)*, 2021, vol. 32, no. 3, pp. 21–39.
35. Matviienko O., Spichak P. Method of increasing the efficiency of the water supply network due to its zoning. *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, 2023, no. 1 (23), pp. 83–95.

Поступила 31.01.2024 г.