

УДК 658.5

ВНЕДРЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВОДНО-РЕСУРСНЫМИ СИСТЕМАМИ В ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

© 2025 А.А. Березина

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
г. Санкт-Петербург, Россия

Статья поступила в редакцию 15.05.2025

В статье предложена модель оптимизации производственных процессов в водно-ресурсных системах целлюлозно-бумажного производства, которая основана на автоматизации принятия управленческих решений с использованием технологий Интернета вещей. Применение данной концепции позволяет существенно минимизировать потребление свежей воды за счет внедрения автоматизации процессов, сократить объем сточных вод, что в свою очередь снижает негативное воздействие на окружающую среду, сохраняя при этом высокое качество продукции и экономическую эффективность. Основной новизной исследования является интеграция передовых технологий, таких как машинное обучение и интернет вещей, с динамическим управлением водными ресурсами, что позволяет учитывать экологические, экономические и технологические аспекты в единой системе. Предложенный алгоритм машинного обучения для обнаружения утечек воды в системе водоотведения, основанный на данных, полученных от Интернета вещей, позволяет оптимизировать процессы, связанные с использованием воды на всех этапах жизненного цикла производства. Это создает более рациональную и эффективную систему управления водными ресурсами и помогает предотвратить потенциальные аварии на всех этапах технологического процесса изготовления продукции.

Ключевые слова: целлюлозно-бумажная промышленность, оптимизация, производственные процессы, автоматизация, водно-ресурсные системы, Интернет вещей, машинное обучение.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3-46-57

EDN: NDCRPK

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия целлюлозно-бумажное производство стало неотъемлемой частью экономики многих стран, обеспечивая разнообразный спектр продукции, включая бумагу и упаковочные материалы. Однако с учетом растущего спроса на эти изделия и необходимости снижения негативного воздействия на окружающую среду, оптимизация производственных процессов представляет собой актуальную задачу для данной отрасли. В условиях современного производства особенно важным аспектом является эффективное управление водными ресурсами, поскольку вода является критически важным компонентом на всех этапах производственного цикла — от подготовки сырья до завершения изготовления готовой продукции.

Проблемы управления водными ресурсами становятся все более актуальными на фоне глобальных изменений климата и растущего потребления водных ресурсов. Эффективное использование водных ресурсов не только позволяет существенно снизить эксплуатационные затраты, но и минимизирует негативное воздействие на экосистему, что приобретает критическое значение в условиях современного устойчивого развития. В связи с этим разработка инновационных решений и методов оптимизации производственных процессов в системах управления водными ресурсами представляет собой важную задачу.

Автоматизация в целлюлозно-бумажном производстве играет ключевую роль в оптимизации управления водными ресурсами. Современные технологии автоматизации обеспечивают возможность интеграции различных процессов и позволяют более эффективно контролировать поток воды на всех стадиях производства. Использование средств автоматизации, таких как датчики, системы управления и программное обеспечение, предоставляет возможность в реальном времени отслеживать потребление воды, а также выявлять неэффективное использование ресурсов и потенциальные утечки [1].

Одним из ключевых направлений в сфере автоматизации процессов является интеграция Интернета вещей (IoT), что позволяет разрабатывать высокоэффективные интеллектуальные системы, способные к динамическому обмену данными и оперативному принятию решений на основе анализа текущей информации.

*Березина Анна Андреевна, аспирант кафедры инноватики и интегрированных систем качества.
E-mail: anybaranova299751@yandex.ru*

Автоматизация процессов управления водными ресурсами, основанная на использовании IoT, содействует созданию замкнутых водных систем. В таких системах происходит непрерывный цикл водопотребления, где отработанная вода подвергается очистке и повторному использованию в производственном процессе. Данная концепция значительно минимизирует потребление свежей воды, что обуславливает значительный вклад в процессы устойчивого развития, а также в обеспечение экологической и промышленной безопасности.

Также стоит отметить, что автоматизация процессов не только способствует снижению затрат и повышению эффективности, но и обеспечивает соблюдение экологических норм и стандартов. При внедрении автоматизированной системы управления значительно упрощается процесс мониторинга и контроля соблюдения нормативных требований по выбросам и качеству сточных вод. Это позволяет обеспечить более эффективное отслеживание параметров и быстрое реагирование на возможные отклонения, что способствует повышению надежности и устойчивости эколого-производственной инфраструктуры [2].

Целью исследования является разработка модели оптимизации производственных процессов в водно-ресурсных системах целлюлозно-бумажного производства с автоматизацией принятия управленческих решений и использованием интернет вещей IoT. Применение данной модели позволяет минимизировать потребление свежей воды, сократить объем сточных вод и снизить негативное воздействие на окружающую среду, при этом сохраняя высокое качество продукции и экономическую эффективность.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ВОДНО-РЕСУРСНЫХ СИСТЕМАХ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА С АВТОМАТИЗАЦИЕЙ ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ IoT

Применение Интернета вещей (IoT) в сочетании с машинным обучением представляет собой одну из перспективных и инновационных областей на пересечении технологий. Данное сочетание не только трансформирует существующие процессы в различных секторах, но и открывает новые горизонты для научно-технических инноваций.

Одной из ключевых характеристик применения IoT совместно с машинным обучением является высокая степень автоматизации, позволяющая значительно повысить эффективность и точность операций. Благодаря интеграции интеллектуальных алгоритмов устройства, подключенные к Интернету вещей, получают возможность не только собирать и передавать данные в реальном времени, но и самостоятельно анализировать эти данные для извлечения ценной информации. Данный подход формирует основу для глубокого анализа данных, который, предоставляет компаниям возможность предотвратить потенциальные неисправности и оптимизировать производственные процессы на основе аналитических выводов, основанных на заранее выявленных закономерностях. Такой анализ включает изучение больших объемов информации и выявление трендов и закономерностей, что позволяет организациям более точно оценивать текущее состояние своих систем и прогнозировать их работу в будущем. Более того, применение машинного обучения позволяет устройствам интерпретировать и реагировать на изменения в окружающей среде, адаптируясь к новым условиям без необходимости постоянного ручного управления. Это не только повышает гибкость и устойчивость производственных систем, но и способствует созданию более эффективных и устойчивых производственных процессов, ориентированных на защиту окружающей среды и оптимизацию производственных процессов, включая вспомогательные и обслуживающие участки, становится важнейшим аспектом в решении задач экологической и промышленной безопасности [3].

Основной целью данной модели является создание эффективной и устойчивой системы управления водными ресурсами в целлюлозно-бумажном производстве, что включает в себя не только оптимизацию процессов водопользования, но и минимизацию загрязнения сточных вод. Данная модель представляет собой комплексный подход к оптимизации водно-ресурсных систем, который охватывает все этапы производства: от заготовки древесины до переработки и упаковки готовой продукции. Внедрение предложенной модели оптимизации водных ресурсов в целлюлозно-бумажном производстве связано с необходимостью значительных капиталовложений в современные технологии, специализированное оборудование и системы мониторинга. Тем не менее, данные финансовые затраты могут быть оправданы потенциальными экономическими и экологическими выгодами, а также улучшением экологической и промышленной безопасности, которые она обеспечивает. Эффективное управление водными ресурсами не только снижает эксплуатационные расходы, но и значительно уменьшает загрязнение окружающей среды, что способствует соблюдению стандартов безопасности и нормативных требований, обеспечивая более устойчивое функционирование предприятия и сохранение окружающей природной среды.

Создание модели оптимизации производственных процессов в водно-ресурсных системах целлюлозно-бумажного производства с автоматизацией принятия управленческих решений с использованием Интернета вещей (IoT) требует интеграции нескольких компонентов и подходов. Эта модель включает мониторинг, моделирование качества воды, а также применение методов оптимизации для достижения устойчивого и эффективного управления водными ресурсами (рис. 1).

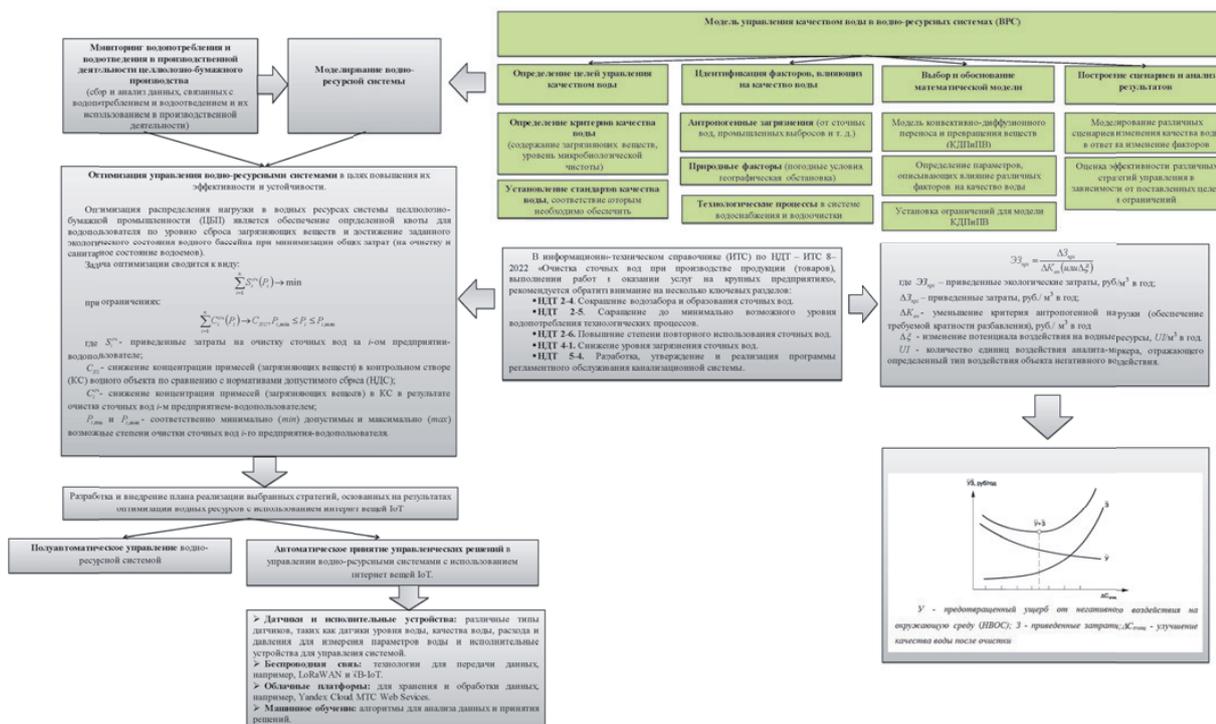


Рис. 1. Модель оптимизации производственных процессов в водно-ресурсных системах целлюлозно-бумажного производства с автоматизацией принятия управленческих решений с использованием интернета вещей IoT

На первом этапе необходимо разработать систему мониторинга, способную эффективно отслеживать как водопотребление, так и водоотведение в процессе производственной деятельности. Для реализации этой задачи используются сенсоры и устройства Интернета вещей (IoT), установленные в ключевых точках производственного процесса. Эти устройства будут систематически собирать данные в реальном времени о различных аспектах использования воды, включая объёмы потребляемой воды на каждом этапе производства, уровень загрязняющих веществ в сточных водах, объём сточных вод, характеристики загрязнений, а также функционирование очистных сооружений. В частности, сенсоры будут контролировать такие критически важные параметры, как pH, температура, расход воды, содержание растворенных веществ и другие компоненты, имеющие значение для оценки качества и состояния водных ресурсов.

Собранные с сенсоров данные будут передаваться в центральную базу данных, где они будут подвергнуты тщательному анализу для формирования полноценных и комплексных характеристик водных потоков. Эта система позволит быстро реагировать на любые аномалии, возникающие в состоянии воды, и обеспечивать соответствие установленным стандартам качества. Данные собираются с помощью высокотехнологичных датчиков, счетчиков и других измерительных приборов, которые обеспечивают точность и надежность информации, необходимой для эффективного управления водными ресурсами.

Вторым шагом в процессе управления качеством воды является моделирование водно-ресурсной системы (ВРС), которое представляет собой важный инструмент для эффективного управления качеством водных ресурсов. Данный подход обеспечивает комплексный анализ множества факторов и параметров, которые оказывают влияние на состояние водопользования, включая не только физико-химические характеристики водных ресурсов, но и разнообразные антропогенные воздействия, климатические изменения, а также особенности технологических процессов. В результате моделирование способствует принятию более обоснованных решений в сфере управления водными ресурсами.

Для успешного моделирования системы управления качеством воды в ВРС необходимо выполнить несколько ключевых этапов:

1. Определение целей управления качеством воды, которые должны соответствовать конкретным задачам охраны и рационального использования водных ресурсов. Эти цели могут включать в себя такие аспекты, как снижение уровней загрязнения, обеспечение соблюдения экологических норм, увеличение доступности чистой воды и восстановление экосистем водоемов. Четкая формулировка целей будет способствовать более точному определению ключевых параметров, которые необходимо анализировать.

2. Идентификация факторов, оказывающих влияние на качество водных ресурсов. Эти факторы можно классифицировать на три категории: антропогенные, природные и технологические. Углубленный анализ каждого из этих факторов действительно является ключевым этапом в разработке точной и надежной математической модели, которая позволит более эффективно моделировать и прогнозировать изменения в качестве воды.

3. Выбор и обоснование математической модели, способной учесть влияние различных факторов на качество водных ресурсов, требует тщательного анализа процессов, связанных с конвективно-диффузионным переносом веществ и их трансформацией. Эта модель предоставит возможность более детально описать динамику перемещения веществ и изменения химического состава водной среды под воздействием антропогенных, природных и технологических факторов. Применение такого подхода обеспечит углубленное понимание сложных взаимодействий, происходящих в водной экосистеме, а также повысит точность прогнозирования изменений в качестве воды в различных сценариях.

Модель конвективно-диффузионного переноса и превращения веществ (КДПиПВ) представляет собой мощный инструмент для анализа и прогнозирования состояния водных ресурсов, поскольку она максимально учитывает разнообразные факторы, влияющие на динамику загрязнения и изменения в водоемах. Эта модель эффективно сочетает в себе процессы конвекции, диффузии и химических реакций, что позволяет детально проанализировать, как антропогенные активности, природные условия и технологические воздействия взаимодействуют друг с другом и оказывают влияние на качество воды [4].

Основной функцией математической модели КДПиПВ является возможность определения допустимого уровня сброса от каждого водопользователя, основываясь на заданных характеристиках конкретного водного объекта и установленных нормах (классе) качества воды. Эта характеристика делает модель особенно ценной, так как позволяет эффективно управлять водными ресурсами, устанавливая разумные ограничения на сбросы и предотвращая негативные последствия для экосистемы. Важным аспектом этой модели является ее гибкость: она может адаптироваться к различным условиям, таким как изменение потоков загрязняющих веществ и колебания природных факторов.

Кроме того, модель КДПиПВ предоставляет возможность анализа изменений в качестве воды в условиях аварий и чрезвычайных ситуаций, что является ключевым для оперативного реагирования на различные происшествия, связанные с загрязнением экосистемы и ухудшением состояния водных ресурсов.

$$v_{xj} \cdot \frac{\partial C_i}{\partial x} = D_y \cdot \frac{\partial^2 C_i}{\partial y^2} - k_1 \cdot C_i, \quad (1)$$

где C_i – концентрация вещества, мг/л;

v_{xj} – средняя скорость течения, м/с;

D_y – коэффициент поперечной диффузии, м²/с;

k_1 – коэффициент биохимического окисления 1/сут;

x – продольная координата, м;

y – поперечная координата, м.

Граничные условия:

- при $x=0$, то $C_i(0,y)$;

- при $y=0$, то $\frac{\partial C}{\partial y} = \begin{cases} A & |x| \leq a \\ 0 & |x| > a \end{cases}$;

- при $y = B - \frac{\partial C}{\partial y} = 0$ [5].

4. Построение сценариев и анализ результатов.

После создания математической модели, описывающей процессы конвективно-диффузионного переноса и превращения веществ в водной среде, осуществляется разработка множества сценариев, позволяющих смоделировать изменения качества воды под воздействием различных факторов. К числу таких факторов относятся антропогенные нагрузки, изменения климата и ряд управленческих решений. Анализ результатов, полученных в рамках этих сценариев, предоставляет возмож-

ность не только предсказать возможное ухудшение или улучшение качества водных ресурсов, но и оценить эффективность различных стратегий управления.

К примеру, основанная на моделировании оценка воздействия снижения выбросов загрязняющих веществ или внедрения новых технологий очистки дает представление о том, как такие меры влияют на параметры модели и, следовательно, на конечное качество воды. Полученные данные позволяют разработать обоснованные управленческие решения, направленные на минимизацию негативного воздействия и оптимизацию управления водными ресурсами, наряду с обеспечением устойчивого развития.

В контексте оптимизации управления водно-ресурсными системами, применение модели конвективно-диффузионного переноса обеспечивает возможность разработки стратегий, направленных на повышение эффективности управления качеством водных ресурсов. С её помощью можно оценивать влияние различных управленческих стратегий, таких как регулирование сбросов сточных вод и сохранение экологических систем. Полученные данные помогут в создании оптимальных режимов использования водных ресурсов, позволяя минимизировать потенциальные угрозы для экосистемы.

На основе полученных результатов моделирования и данных мониторинга можно сделать обоснованные выводы о том, какие стратегии управления наиболее эффективны при достижении поставленных целей, что позволяет не только оптимизировать процессы водопотребления и водоотведения, но и улучшить качество воды, обеспечивая сбалансированное взаимодействие между экологической и промышленной безопасностью в управлении водными ресурсами.

Целевой функцией оптимизации распределения нагрузки в системе водопотребления и водоотведения предприятия целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП) является обеспечение определенной квоты для водопользователя по уровню сброса загрязняющих веществ и достижение заданного экологического состояния водного бассейна при минимизации общих затрат.

Задача оптимизации сводится к виду:

$$\sum_{i=1}^n S_i^{оч}(P_i) \rightarrow \min, \quad (2)$$

при ограничениях:

$$\sum_{i=1}^n C_i^{оч}(P_i) \rightarrow C_{КС}, P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max}, \quad (3)$$

где $S_i^{оч}$ – приведенные затраты на очистку сточных вод на i -ом предприятии-водопользователе;
 $C_{КС}$ – снижение концентрации примесей (загрязняющих веществ) в контрольном створе (КС) ВО по сравнению с НДС;

$C_i^{оч}$ – снижение концентрации примесей (загрязняющих веществ) в КС в результате очистки сточных вод i -м предприятием-водопользователем;

$P_{i,\min}$ и $P_{i,\max}$ – соответственно минимально (*min*) допустимые и максимально (*max*) возможные степени очистки сточных вод i -го предприятия-водопользователя.

Для нахождения оптимальных параметров введены следующие ограничения:

Обеспечение в контрольных створах низких уровней загрязненности воды: $C_{\max} \leq 2 \cdot C_i$.

В сточных водах концентрация загрязняющих веществ не должна превышать верхний предел среднего уровня загрязненности.

Суммарная масса сброса загрязняющих веществ от всех предприятий бассейна не должна превышать установленный норматив допустимых воздействий за вычетом диффузной нагрузки:

$$\sum_{i=1}^n НДС_i \leq 0.8 \cdot НДС - M_{дифф}.$$

Установленный норматив допустимых сбросов не может превышать фактического сброса предприятия: $НДС_i \leq M_{факти}$.

Для предприятий первой категории воздействия на водные объекты, установленный норматив на сброс загрязняющих веществ не может быть меньше показателя, достигаемого при использовании НДТ: $НДС_i \leq P_i \cdot q_{ni}$.

Рассмотренная выше задача оптимизации техногенной нагрузки для предприятий-водопользователей ВРС ЦБП позволяет создать более эффективные механизмы управления водопотреблением и водоотведением с целью оптимизации использования водных ресурсов [6].

Экономический механизм регулирования водопользованием на государственном уровне основан на разнице между затратами предприятия-объекта негативного воздействия (ОНВ) на внедрение наилучших доступных технологий (НДТ) и платежей за негативное воздействие на окружающую среду (НВОС).

Эколого-технико-экономическая целесообразность внедрения водоохранных мероприятий учитывает не только экономическую выгоду от внедрения наилучших доступных технологий очистки сточных вод, но и воздействие НДТ на окружающую среду и ее техническую реализуемость.

В работе [7] представлена методика эколого-технико-экономического обоснования водоохранных мероприятий, основанная на классической методике технико-экономического обоснования в сочетании экологических показателей и включающая следующие основные этапы (рис. 2):

- установление факта несоблюдения нормативов качества воды водного объекта по результатам контроля хозяйственной деятельности ОНВ по маркерным показателям I - II классов опасности (аналит-маркерам). Этот этап необходим для выявления источников загрязнения и определения необходимых мер для комплексного подхода к решению экологических проблем;

- выбор НДТ по снижению негативного воздействия, направленных на снижение негативного воздействия на водные объекты.

В информационно-техническом справочнике (ИТС) по НДТ – ИТС 8–2022 «Очистка сточных вод при производстве продукции (товаров), выполнении работ и оказании услуг на крупных предприятиях», рекомендуется обратить внимание на несколько ключевых разделов:

- НДТ 2-4. Сокращение водозабора и образования сточных вод.
- НДТ 2-5. Сокращение до минимально возможного уровня водопотребления технологических процессов.
- НДТ 2-6. Повышение степени повторного использования сточных вод.
- НДТ 4-1. Снижение уровня загрязнения сточных вод.
- НДТ 5-4. Разработка, утверждение и реализация программы регламентного обслуживания канализационной системы [8].

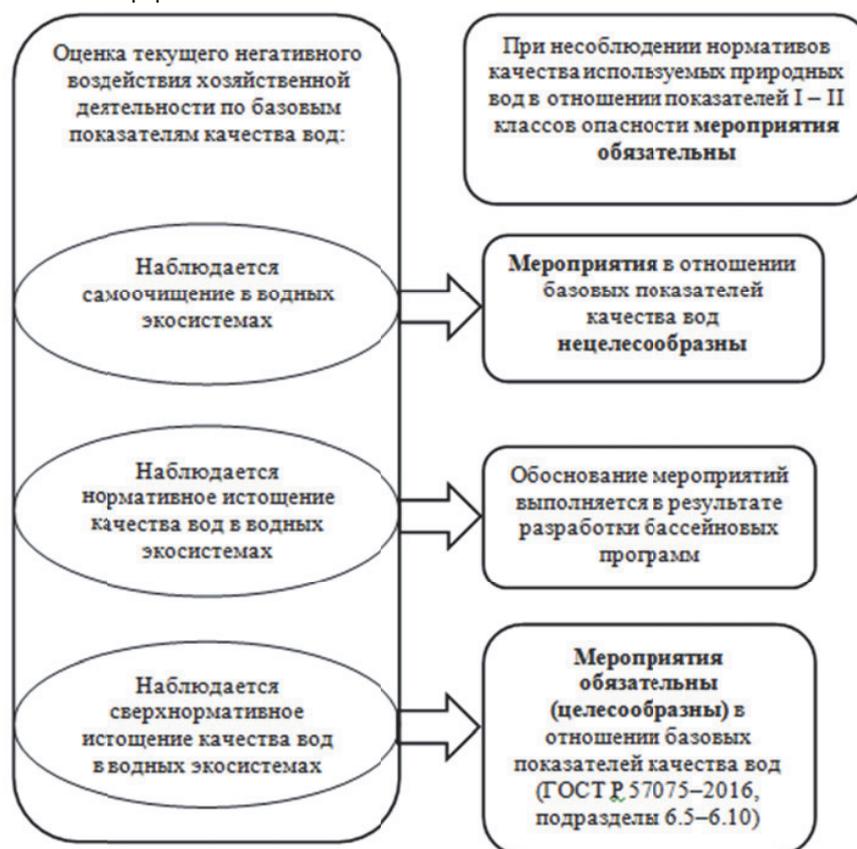


Рис. 2. Алгоритм обоснования целесообразных водоохранных мероприятий

Для анализа эколого-технико-экономической целесообразности внедрения водоохранных мероприятий, включая НДТ, необходимо рассчитать приведенные экологические затраты по показателям экологичности (критерию антропогенной нагрузки и потенциалу воздействия), по формуле:

$$\mathcal{E}Z_{npi} = \frac{\Delta Z_{npi}}{\Delta K_{an}(\text{или } \Delta \xi)}, \quad (4)$$

где $\mathcal{E}Z_{npi}$ – приведенные экологические затраты, руб./м³ в год;

ΔZ_{npi} – приведенные затраты, руб./ м³ в год;

$\Delta K_{ан}$ – уменьшение критерия антропогенной нагрузки (обеспечение требуемой кратности разбавления), руб./ м³ в год

$\Delta \xi$ – изменение потенциала воздействия на водные ресурсы, УИ/м³ в год. УИ - количество единиц воздействия анализатора-маркера, отражающего определенный тип воздействия ОНВ.

Включение вышеуказанных показателей при анализе эколого-техничко-экономической целесообразности (рис. 3) обеспечивает стандартизованный и объективный подход к сравнению различных технологий очистки по себестоимости снятия одной единицы воздействия, который отражает затраты, необходимые для сокращения загрязнения на определенную величину (единицу воздействия). Чем выше эффективность выбранной НДТ, тем меньше ущерб, наносимый водному объекту, что приводит к снижению природоохранных издержек и, следовательно, к увеличению прибыли предприятия. Таким образом, предлагаемый подход позволяет выбрать оптимальную технологию очистки сточных вод, которая не только экономически выгодна, но и минимизирует НВОС [9].

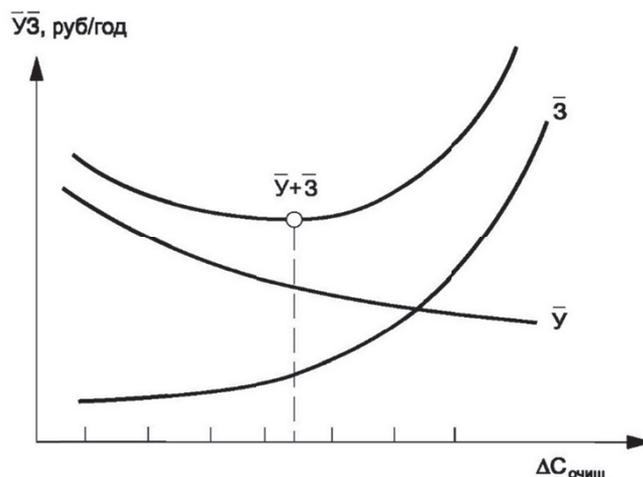


Рис. 3. Оценка эколого-техничко-экономической целесообразности внедрения НДТ по очистке сточных вод:
 У - предотвращенный ущерб от НВОС; Z - приведенные затраты;
 DS_{очист} - улучшение качества воды после очистки

Оценка эколого-техничко-экономической целесообразности внедрения НДТ обеспечивает комплексный анализ, который включает в себя как экономические, так и экологические аспекты.

С экономической стороны, данный процесс позволяет организациям осуществить всестороннюю оценку потенциальной выгоды от интеграции НДТ, включая, например, снижение затрат на очистку сточных вод, увеличение эффективности переработки материалов и оптимизацию производственных процессов. Эти аспекты ведут к снижению операционных расходов и повышению общей прибыльности предприятия.

С экологической точки зрения, оценка эколого-техничко-экономической целесообразности включает в себя анализ соответствия действующим экологическим стандартам и нормам, что является необходимым условием для минимизации НВОС. Устойчивое соблюдение законодательных требований в области охраны окружающей среды становится неотъемлемой частью стратегии развития организаций, поскольку это снижает риск возникновения правовых последствий и репутационных потерь.

Таким образом, использование комплексного подхода в управления качеством воды в ВРС способствует более эффективному контролю за загрязнением сточных вод, позволяет выявлять и минимизировать источники негативного воздействия на водные ресурсы, а также обеспечивает интеграцию различных технологий и методов, что позволяет оптимизировать процессы очистки и управления водными ресурсами.

АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ (IoT) И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Следующим важным шагом в процессе управления водно-ресурсными системами является разработка и внедрение плана реализации выбранных стратегий, основанных на результатах оптимизации водных ресурсов. В данном контексте особое внимание уделяется внедрению технологий Интернета вещей (IoT), которые значительно повысят эффективность и устойчивость управления водными ресурсами.

Основными компонентами этого плана являются полуавтоматическое управление водно-ресурсной системой или автоматическое принятие управленческих решений на основе данных, собранных с помощью IoT. В данной работе используется внедрение автоматического управления, так как этот подход позволяет значительно повысить эффективность управления водными ресурсами благодаря постоянному мониторингу и оперативной обработке данных, собранных с помощью IoT-решений [10].

Для достижения этих целей необходима интеграция различных технологий и решений. Во-первых, необходимо использовать разнообразные датчики и исполнительные устройства. Датчики уровня воды, качества воды, расхода и давления будут служить для измерения ключевых параметров водных ресурсов, позволяя постоянно отслеживать состояние системы. Исполнительные устройства, включая насосы и клапаны, смогут непосредственно управлять потоками воды в зависимости от полученной информации.

Важной составляющей является беспроводная связь, которая обеспечивает передачу данных от датчиков к центральной системе. Здесь могут быть использованы современные технологии, такие как LoRaWAN и NB-IoT, которые демонстрируют высокую эффективность при передаче небольших объемов данных на большие расстояния, что особенно актуально для удаленных и труднодоступных мест.

Кроме того, облачные платформы, такие как Yandex Cloud и MTC Web Services, играют важную роль в этом процессе. Они обеспечивают необходимую инфраструктуру для хранения и обработки больших объемов данных, собранных с помощью датчиков. Это позволяет не только хранить данные, но и анализировать их в реальном времени, что критически важно для мгновенного реагирования на изменения в состоянии водных ресурсов [11].

Наконец, одним из ключевых элементов является применение алгоритмов машинного обучения для глубокого анализа данных. Эти алгоритмы помогут не только в прогнозировании изменений параметров водных ресурсов, но и в автоматическом принятии управленческих решений. Они могут выявлять закономерности и отклонения в данных, что облегчает процесс принятия решений и оптимизации управления водно-ресурсной системой [12].

Таким образом, применение разработанной модели позволит:

- снизить потребления воды и объемы сточных вод;
- уменьшить негативное воздействие на окружающую среду;
- повысить эффективности производства;
- снизить затраты;
- улучшить качество управления производственными процессами, что позволит более эффективно отслеживать и контролировать использование ресурсов.

Автоматизация принятия решений в управлении водными ресурсами с использованием Интернета вещей (IoT) и алгоритмов машинного обучения представляет собой комплексный процесс, в котором каждая составляющая играет важную роль в повышении эффективности и надежности систем управления. Архитектура такой системы базируется на интеграции различных технологий и этапов обработки данных (рис. 4).

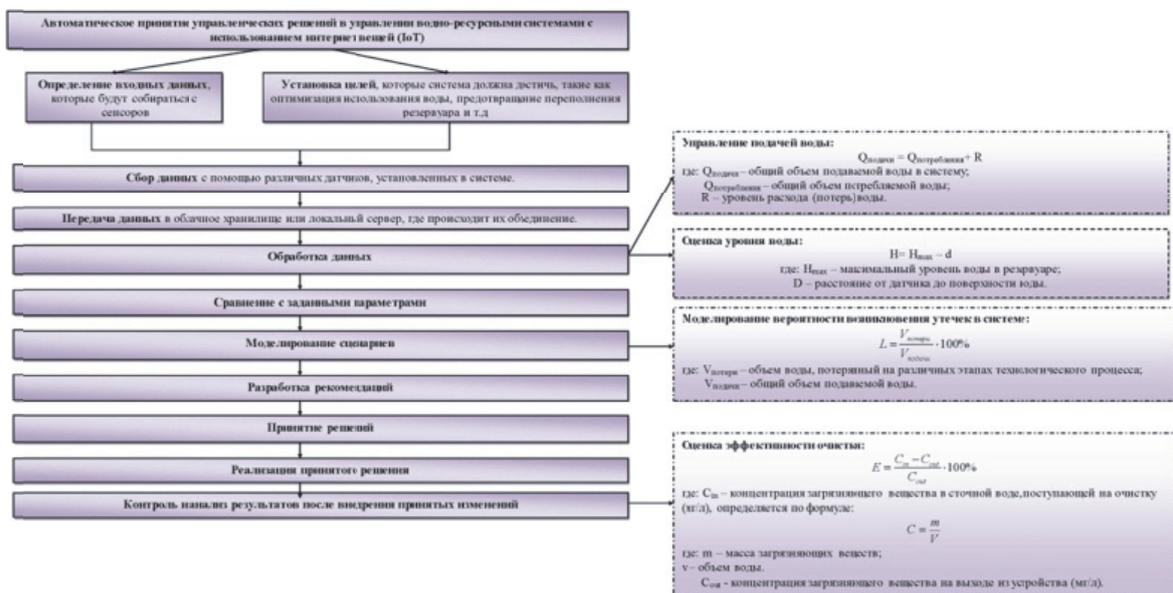


Рис. 4. Архитектура системы автоматизации принятия решений в управлении ВРС с использованием Интернета вещей (IoT)

РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЯ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В УПРАВЛЕНИЕ ВОДНЫМИ РЕСУРСАМИ СИСТЕМ ВОДООТВЕДЕНИЯ

В качестве примера применения методов машинного обучения с целью автоматизации процесса принятия решений в управлении ВРС приведен алгоритм классификации для прогнозирования вероятности возникновения утечек воды в системе водоотведения в зависимости от давления, расхода и уровня воды (рис.5) позволяет значительно улучшить управление водными ресурсами, обеспечивая более предсказуемое и опережающее реагирование на потенциальные проблемы, такие как утечки в трубопроводах, загрязнение воды, износ оборудования, изменение в водопотреблении. Применение данного алгоритма дает возможность выявлять критические условия, предшествующих утечкам в системе водоотведения, основываясь на таких факторах, как давление, расход и уровень воды, что, в свою очередь, позволяет значительно снизить риск возникновения аварий и предотвратить ухудшение качества выпускаемой продукции.

```

Алгоритм классификации для прогнозирования вероятности возникновения утечек воды в системе водоотведения в зависимости от давления, расхода и уровня воды

import pandas as pd
import numpy as np
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.linear_model import LogisticRegression
from sklearn.metrics import accuracy_score, classification_report

# 1. Загрузка данных (пример данных)
data = {
    'Давление': [2.5, 2.4, 2.3, 1.8, 2.5, 2.6, 2.7, 1.5, 2.4, 2.3], # Примеры значений давления
    'Расход': [100, 95, 90, 50, 105, 110, 115, 40, 92, 88], # Примеры значений расхода
    'Уровень': [5, 4.8, 4.6, 2, 5.2, 5.4, 5.6, 1.5, 4.9, 4.7], # Примеры значений уровня воды
    'Утечка': [0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0] # 0 - нет утечки, 1 - есть утечка
}
df = pd.DataFrame(data)

# 2. Подготовка данных
X = df[['Давление', 'Расход', 'Уровень']] # Признаки
y = df['Утечка'] # Целевая переменная

# 3. Разделение данных на обучающую и тестовую выборки
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=42)

# 4. Обучение модели логистической регрессии
model = LogisticRegression()
model.fit(X_train, y_train)

# 5. Прогнозирование на тестовой выборке
y_pred = model.predict(X_test)

# 6. Оценка качества модели
accuracy = accuracy_score(y_test, y_pred)
print("Точность: {accuracy}")
print(classification_report(y_test, y_pred))

# 7. Пример использования модели для новых данных
new_data = pd.DataFrame({'Давление': [1.7, 2.6], 'Расход': [45, 112], 'Уровень': [18, 5.5]})
predictions = model.predict(new_data)
print("Прогнозы для новых данных:", predictions)

# 8. Интерпретация (пример):
coefficients = model.coef_[0]
intercept = model.intercept_[0]

print("Коэффициенты:", coefficients) # Влияние каждого признака
print("Интерсепт:", intercept) # Свободный член

# Пример вероятности утечки
probability = model.predict_proba(new_data)[0, 1]
print("Вероятность утечки:", probability)
    
```

Рис. 5. Алгоритм машинного обучения для обнаружения утечек воды в системе водоотведения

На рис. 6 представлен процесс логистической регрессии, который был использован для классификации данных. В части «а» представлен Python-код, который осуществляет обработку и анализ данных, включая предварительную обработку, выборку признаков и обучение модели. В части «б» представляется результат работы алгоритма в виде вероятностного распределения, которое показывает вероятность возникновения утечек в различных условиях.

На основе представленных метрик, включая общую точность (accuracy), показатели точности (precision), полноты (recall) и F1-меры для каждой категории, можно сделать несколько выводов о модели, предназначенной для обнаружения утечек воды в системе водоотведения:

1. Общая точность модели (f1-score support) составляет 0.85, что свидетельствует о том, что 85% всех предсказаний, сделанных моделью, являются правильными. Это довольно высокий показатель, свидетельствующий о том, что модель в целом справляется со своей задачей. Высокая точность (0.91) и удовлетворительная полнота (0.83) означают, что модель правильно классифицирует большинство примеров этого класса. Поддержка в 12 экземпляров говорит о достаточном количестве данных, чтобы можно было уверенно интерпретировать эти значения.

2. Для класса «0»: F1-score составляет 0.87. Точность модели составляет 0.91. Это свидетельствует о высокой способности модели правильно идентифицировать случаи, когда утечек нет. Полнота для

```

1 import pandas as pd
2 import numpy as np
3 from sklearn.model_selection import train_test_split
4 from sklearn.linear_model import LogisticRegression
5 from sklearn.metrics import accuracy_score, classification_report
6
7 #
8 np.random.seed(0)
9 data_size = 100
10 X = pd.DataFrame({
11     'feature1': np.random.randn(data_size),
12     'feature2': np.random.randn(data_size)
13 })
14 y = (X['feature1'] + X['feature2'] > 0).astype(int) #
15
16 #
17 X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y,
18     test_size=0.2, random_state=0)
19 #
20 model = LogisticRegression()
21 model.fit(X_train, y_train)
22 #
23 #
24 y_pred = model.predict(X_test)
25 print("Accuracy:", accuracy_score(y_test, y_pred))
26 print("Classification Report:\n", classification_report(y_test,
27     y_pred))
    
```

а

Точность модели: 0.85

	precision	recall	f1-score	support
0	0.91	0.83	0.87	12
1	0.78	0.88	0.82	8
accuracy			0.85	20
macro avg	0.84	0.85	0.85	20
weighted avg	0.86	0.85	0.85	20

б

Рис. 6. Логистическая регрессия:

а. Python-код для классификации; б. Результат вероятности возникновения утечки воды

этого класса равна 0.83, что означает, что хотя модель эффективно классифицирует большинство случаев без утечек, все же 17% действительно негативных случаев были ошибочно классифицированы как положительные. Это указывает на наличие ложноположительных результатов, что в контексте обнаружения утечек может привести к дополнительным затратам на проверку и обследование несуществующих проблем. Поддержка в 12 экземпляров говорит о достаточном количестве данных, чтобы можно было уверенно интерпретировать эти значения.

3. Для класса «1»: F1-score модели составляет 0.82, что свидетельствует о достаточно хорошей производительности, хотя этот показатель несколько ниже, чем у класса 0. Точность модели составляет 0.78, что свидетельствует о том, что лишь 78% всех предсказаний о наличии утечек были правильными. Однако полнота, равная 0.88, указывает на то, что модель довольно эффективно выявляет случаи утечек, поскольку 88% всех реальных утечек были правильно предсказаны. Поддержка составляет 8 экземпляров, что меньше, чем для класса 0, и может указывать на то, что результаты требуют более осторожной интерпретации из-за меньшего объема данных.

Проанализировав полученные данные можно сделать вывод, что модель надежна в обнаружении утечек, но так же необходимо обратить внимание на необходимость улучшения точности F1-score модели для уменьшения ложноположительных результатов и повышения общей эффективности системы в обнаружении утечек.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье разработана модель оптимизации производственных процессов в водно-ресурсных системах целлюлозно-бумажного производства, основанная на автоматизации управленческих решений с использованием технологий Интернета вещей (IoT). Внедрение данной модели способствует устойчивому развитию целлюлозно-бумажной отрасли, обеспечивая экологическую и промышленную безопасность, а так же обеспечивает экономическую эффективность производства.

Новизна предложенной модели заключается в интеграции передовых технологий, таких как машинное обучение и Интернет вещей (IoT), с динамическим управлением водными ресурсами в целлюлозно-бумажной промышленности. Объединение в единую модель экологических, экономических и технологических аспектов управления водными ресурсами на предприятиях ЦБП позволяет учитывать взаимосвязи между различными показателями и принимать более обоснованные решения. В отличие от традиционных методов, которые полагались на ручной мониторинг и статические системы контроля, автоматизированное принятие управленческих решений на основе оперативно получаемых данных дает возможность сократить время реакции на изменения в системе и снизить риск ошибок, связанных с человеческим фактором.

Результаты внедрения машинного обучения в управление водными ресурсами, в частности в систему водоотведения, показывают явные преимущества в отношении повышения эффективности мониторинга и управления ВРС. Эти технологии позволяют существенно улучшить процессы обнаружения утечек воды в системе водоотведения, что в свою очередь ведет к более быстрому реагированию на возникшие проблемы.

Однако существующие результаты также подчеркивают необходимость дальнейшей оптимизации модели, что открывает дополнительные горизонты для исследований и практического применения.

Данные алгоритмы способны анализировать большие объемы информации в режиме реального времени, и вместе с аналитическими возможностями машинного обучения это создает потенциал для более точного прогнозирования и управления ресурсами, что является крайне важным для устойчивого развития целлюлозно-бумажной отрасли и охраны окружающей среды. Выявляя аномалии и потенциально проблемные участки, эти технологии не только оптимизируют текущие операции, но и позволяют предотвращать аварии до их возникновения, что в свою очередь способствует повышению надежности и безопасности систем водоотведения на целлюлозно-бумажных производствах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковалев, Д.А. Исследования кафедры автоматизации технологических процессов и производств для целлюлозно-бумажной промышленности / Д.А. Ковалев, Л.С. Анищенко // Энергетика и автоматизация в современном обществе : материалы VII Всероссийской научно-практической конференции обучающихся и преподавателей, Санкт-Петербург, 03 мая 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2024. – С. 238-241.
2. Кобец, Д.В. Роботизация и автоматизация в промышленности / Д.В. Кобец, О.Ю. Авилова, Д.Н. Бойко // Инновации и информационные технологии в условиях цифровизации экономики. 2023. – С. 96-98.
3. Нианг, П.М. Выбор алгоритма машинного обучения для обнаружения вторжений в IoT / П.М. Нианг, В.Г. Сидоренко // Надежность. – 2024. – Т. 24. – №. 3. – С. 44-51.
4. Епифанова, М.А. Расчет величины негативного воздействия на водный объект от предприятий целлюлозно-бумажной промышленности на основе математического моделирования переноса загрязняющих веществ / М.А. Епифанова, А.В. Епифанов, Э.Л. Аким // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2024. – №. 238. – С. 254-266.
5. Жильникова, Н.А. Информационное обеспечение контроля и управления качеством воды в производственных системах / Н.А. Жильникова, В.О. Смирнова, И.А. Шишкин, А.А. Баранова // Журнал «Датчики и системы», 2022. . № 4 (263). – С. 15-20.
6. Жильникова, Н.А. Особенности управления сложными водно-ресурсными системами при изменении климата / Н.А. Жильникова, И.А. Шишкин, А.А. Баранова, Л.А. Климочкина // Компетентность / Competency (Russia). – 2023. – № 9-10. – С. 38 - 45.
7. Жильникова, Н.А. Технико-эколого-экономическая оценка эффективности водопользования производственных систем / Н.А. Жильникова, А.А. Баранова // Наука и бизнес: пути развития. – 2021. – № 12 (126). – С. 70-74.
8. ИТС 8–2022 «Очистка сточных вод при производстве продукции (товаров), выполнении работ и оказании услуг на крупных предприятиях». 2022. – 93 с.
9. Жильникова, Н.А. Методология и инструментарий обеспечения экологичности радиоэлектронных и приборостроительных производств: дисс. ... д-ра техн. наук. – Санкт-Петербург: ГУАП, 2020. – 409 с.
10. Косова, Т.А. Интернет вещей (IoT) в управлении ресурсами организаций / Т.А. Косова // Редакционная коллегия. 2025. – 240с.
11. Путинцева, Д.Е. Применение цифровых технологий в управлении системами водоотведения: автоматизация процессов, мониторинг и прогнозирование / Д.Е. Путинцева // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2024. – №. 12-3. – С. 171-174.
12. Ширяева, М.А. Алгоритм прогнозирования параметров качества водных объектов с использованием нейронной сети / М.А. Ширяева, О.О. Синицына, М.В. Пушкарева, В.В. Турбинский // Анализ риска здоровью. – 2024. – №. 4. – С. 50-62.

IMPLEMENTATION OF AN AUTOMATED WATER RESOURCE SYSTEM CONTROL SYSTEM IN THE PULP AND PAPER INDUSTRY

© 2025 A.A. Berezina

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

The article proposes a model for optimizing production processes in water-resource systems of pulp and paper production, which is based on the automation of management decisions using Internet of Things technologies. The application of this concept allows to significantly minimize the consumption of fresh water through the introduction of process automation, reduce the volume of wastewater, which in turn reduces the negative impact on the environment, while maintaining high product quality and economic efficiency. The main novelty of the study is the integration of advanced technologies, such as machine learning and the Internet of Things, with dynamic water resources management, which allows taking into account environmental, economic and technological aspects in a single system. The proposed machine learning algorithm for detecting water leaks in the drainage system, based on data obtained from the Internet of Things, allows to optimize processes related to water use at all stages of the production life cycle. This creates a more rational and efficient water resources management system and helps prevent potential accidents at all stages of the manufacturing process.

Keywords: pulp and paper industry, optimization, production processes, automation, water resource systems, Internet of Things, machine learning.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3-46-57

EDN: NDCRPK

REFERENCES

1. *Kovalev, D.A.* Issledovaniya kafedry avtomatizacii tekhnologicheskikh processov i proizvodstv dlya cellyulozno-bumazhnoj promyshlennosti / D.A. Kovalev, L.S. Anishchenko // Energetika i avtomatizaciya v sovremennom obshchestve : materialy VII Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii obuchayushchihsya i prepodavatelej, Sankt-Peterburg, 03 maya 2024 goda. – Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj universitet promyshlennykh tekhnologij i dizajna, 2024. – S. 238-241.
2. *Kobec, D.V.* Robotizaciya i avtomatizaciya v promyshlennosti / D.V. Kobec, O.Yu. Avilova, D.N. Bojko // Innovacii i informacionnye tekhnologii v usloviyah cifrovizacii ekonomiki. 2023. – S. 96-98.
3. *Niang, P.M.* Vybor algoritma mashinnogo obucheniya dlya obnaruzheniya vtorzhenij v IoT / P.M. Niang, V.G. Sidorenko // Nadezhnost'. – 2024. – T. 24. – №. 3. – S. 44-51.
4. *Epifanova, M.A.* Raschet velichiny negativnogo vozdejstviya na vodnyj ob'ekt ot predpriyatij cellyulozno-bumazhnoj promyshlennosti na osnove matematicheskogo modelirovaniya perenosa zagryaznyayushchih veshchestv / M.A. Epifanova, A.V. Epifanov, E.L. Akim // Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii. – 2024. – №. 238. – S. 254-266.
5. *Zhil'nikova, N.A.* Informacionnoe obespechenie kontrolya i upravleniya kachestvom vody v proizvodstvennykh sistemah / N.A. Zhil'nikova, V.O. Smirnova, I.A. Shishkin, A.A. Baranova // Zhurnal «Datchiki i sistemy», 2022. . № 4 (263). – S. 15-20.
6. *Zhil'nikova, N.A.* Osobennosti upravleniya slozhnymi vodno-resursnymi sistemami pri izmenenii klimata / N.A. Zhil'nikova, I.A. Shishkin, A.A. Baranova, L.A. Klimochkina // Kompetentnost' / Competency (Russia). – 2023. – № 9-10. – S. 38 - 45.
7. *Zhil'nikova, N.A.* Tekhniko-ekologo-ekonomicheskaya ocenka effektivnosti vodopol'zovaniya proizvodstvennykh sistem / N.A. Zhil'nikova, A.A. Baranova // Nauka i biznes: puti razvitiya. – 2021. – № 12 (126). – S. 70-74.
8. ITS 8–2022 «Ochistka stochnykh vod pri proizvodstve produkcii (tovarov), vypolnenii rabot i okazanii uslug na krupnykh predpriyatiyah». 2022. – 93 s.
9. *Zhil'nikova, N.A.* Metodologiya i instrumentarij obespecheniya ekologichnosti radioelektronnykh priborostroitel'nykh proizvodstv: diss. ... d-ra tekhn. nauk. – Sankt-Peterburg: GUAP, 2020. – 409 s.
10. *Kosova, T.A.* Internet veshchej (IoT) v upravlenii resursami organizacij / T.A. Kosova // Redakcionnaya kollegiya. 2025. – 240s.
11. *Putinceva, D.E.* Primenenie cifrovyykh tekhnologij v upravlenii sistemami vodootvedeniya: avtomatizaciya processov, monitoring i prognozirovanie / D.E. Putinceva // Mezhdunarodnyj zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk. – 2024. – №. 12-3. – S. 171-174.
12. *Shiryaeva, M.A.* Algoritm prognozirovaniya parametrov kachestva vodnykh ob'ektov s ispol'zovaniem nejronnoj seti / M.A. Shiryaeva, O.O. Sinicya, M.V. Pushkareva, V.V. Turbinskij // Analiz riska zdorov'yu. – 2024. – №. 4. – S. 50-62.