

УДК 004.896:658.5

UDC 004.896:658.5

5.2.2. Математические, статистические и инструментальные методы экономики (физико-математические науки, экономические науки)

5.2.2. Mathematical, statistical and instrumental methods of economics (physical and mathematical sciences, economic sciences)

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ВОДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ПРОИЗВОДСТВЕ КОСМЕТИЧЕСКОЙ И ХИМИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ

AUTOMATION OF DOSING AND WEIGHING PROCESSES USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE ELEMENTS IN THE MANUFACTURE OF COSMETIC AND CHEMICAL PRODUCTS

Гукасян Александр Валерьевич
Доктор технических наук, доцент
SPIN-код: 5963-5510
aleksandr_gukasyan@mail.ru
ФГБОУ ВО "Кубанский государственный технологический университет", Краснодар, Россия

Gukasyan Alexandr Valerievich
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor
RSCI SPIN-code: 5963-5510
Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

Момотов Игорь Викторович
Аспирант
ФГБОУ ВО "Кубанский государственный технологический университет", Краснодар, Россия

Momotov Igor Viktorovich
Postgraduate student
Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

Аксенов Кирилл Дмитриевич
SPIN-код: 1788-7664
axenov.kir@gmail.com
ФГБОУ ВО "Кубанский государственный технологический университет", Краснодар, Россия
ООО "Пространство интеллектуальных решений", Новороссийск, Россия

Aksionov Kirill Dmitrievich
RSCI SPIN-code: 1788-7664
axenov.kir@gmail.com
Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia
LLC "Space of intelligent solutions", Novorossiysk, Russia

Угрюмов Илья Сергеевич
Аспирант
SPIN-код: 3056-7465
strelkaugr@mail.ru
ФГБОУ ВО "Кубанский государственный технологический университет", Краснодар, Россия

Ugryumov Ilya Sergeevich
Postgraduate student
RSCI SPIN-code: 3056-7465
strelkaugr@mail.ru
Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

Грачев Никита Алексеевич
Аспирант
teh-novacia.company@yandex.ru
ФГБОУ ВО "Кубанский государственный технологический университет", Краснодар, Россия

Grachev Nikita Alekseevich
Postgraduate student
teh-novacia.company@yandex.ru
Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

Статья посвящена разработке интеллектуальной системы контроля качества воды с использованием формализма конечных автоматов. Проведено моделирование работы в двух режимах — с применением ИИ и без него. Результаты показали снижение числа отклонений и остановок, что подтверждает эффективность подхода. Решение может быть применено в системах водоподготовки и расширено за счёт интеграции дополнительных модулей анализа

The article is devoted to the development of an intelligent water quality control system using the formalism of finite automata. The work was modeled in two modes — with and without AI. The results showed a reduction in the number of deviations and stops, which confirms the effectiveness of the approach. The solution can be applied in water treatment systems and expanded by integrating additional analysis modules

Ключевые слова: КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ВОДЫ, ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ, КОНЕЧНЫЕ АВТОМАТЫ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА, КОСМЕТИЧЕСКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ, ЦИФРОВАЯ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТЬ

Keywords: WATER QUALITY CONTROL, ARTIFICIAL INTELLIGENCE, FINITE STATE MACHINES, MODELING, PROCESS AUTOMATION, COSMETICS INDUSTRY, DIGITAL TRACEABILITY

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-212-030>

1. Введение.

Постановка задачи. Современное производство косметической и химической продукции характеризуется повышенными требованиями к стабильности качества, точности соблюдения рецептур и минимизации производственных издержек. Особое значение в этом контексте имеет качество воды, используемой в качестве одного из ключевых компонентов. Химический состав, кислотность (рН), мутность и другие параметры воды могут существенно варьироваться в зависимости от источника и условий подготовки, что напрямую влияет на характеристики готового продукта.

Традиционные методы контроля качества воды, основанные на лабораторных анализах или ручных измерениях, имеют ограниченную эффективность. Отсутствие оперативного мониторинга входных параметров воды приводит к необходимости корректировок на этапе выхода готовой продукции, что зачастую происходит постфактум. Это увеличивает вероятность брака, приводит к потерям сырья и снижению конкурентоспособности предприятий. На многих производствах контроль качества воды на входе либо отсутствует, либо проводится нерегулярно, что усиливает влияние человеческого фактора и непредсказуемых изменений состава воды.

В рамках настоящего исследования рассматривается применение алгоритмов искусственного интеллекта (ИИ), таких как регрессионные модели, нейронные сети и деревья решений, для автоматизации контроля качества воды. Эти методы позволяют в реальном времени учитывать изменения свойств воды (например, рН, содержание примесей) и

<http://ej.kubagro.ru/2025/08/pdf/30.pdf>

адаптивно корректировать дозирование компонентов, таких как лимонная кислота, для достижения целевых параметров рецептуры. В отличие от традиционного ПИД-регулирования, которое плохо справляется с вариабельностью входных данных, ИИ-алгоритмы обеспечивают проактивное управление, прогнозируя отклонения и минимизируя ошибки на этапе ввода компонентов.

Научная новизна исследования заключается в разработке интеллектуальной системы автоматизированного контроля качества воды, интегрированной в рецептурное производство. В основе подхода лежит использование алгоритмов машинного обучения (регрессионные модели, нейронные сети, деревья решений), что обеспечивает адаптивность к изменению входных параметров воды и возможность корректировки дозирования компонентов в реальном времени. В отличие от существующих решений, предложенная система сочетает методы промышленной автоматизации (SCADA, протоколы Modbus, датчики pH и мутности) с предиктивными алгоритмами искусственного интеллекта, что позволяет перейти от реактивного к проактивному управлению технологическим процессом.

Объектом исследования является процесс контроля качества воды в рецептурном производстве косметических и химических продуктов. **Предмет исследования** – применение элементов ИИ-алгоритмов для повышения точности и адаптивности контроля качества воды с последующей корректировкой рецептуры.

Цель исследования заключается в минимизации брака в производстве косметической и химической продукции путём разработки интеллектуальной системы контроля качества воды на входе в реактор, обеспечивающей адаптивную корректировку дозирования.

Задачи исследования:

- разработка модели автоматизированного мониторинга параметров

воды, интегрированной с системами промышленной автоматизации;

- изучение эффективности использования элементов ИИ-алгоритмов в обеспечении точности контроля качества воды с последующей оптимизацией рецептур;

- сравнение предложенной системы с традиционными методами контроля для оценки ее влияния на снижение производственных потерь.

Таким образом, внедрение интеллектуальных систем, объединяющих технологии машинного обучения и стандартные автоматизированные средства контроля, позволяет обеспечить оперативный мониторинг качества воды на входе в реактор, минимизировать производственные потери и повысить эффективность рецептурного производства в косметической и химической отраслях.

2. Литературный обзор

Существующие подходы к автоматизации контроля качества воды демонстрируют широкий спектр методов, от классических систем управления до современных решений на основе искусственного интеллекта. В косметической промышленности примером является проект L'Oréal и IBM Research по созданию генеративной модели для автоматизации проектирования рецептур, повышающей точность производства за счёт оптимизации компонентов [1]. Аналогичные методы активно применяются в области водоподготовки и очистки сточных вод, где глубокие нейронные сети (DNN, RNN, LSTM) позволяют прогнозировать параметры качества воды, выявлять аномалии и оптимизировать технологические процессы без участия эксперта [2]. Практическая реализация включает программное обеспечение на Python для сбора, синхронизации и анализа данных, что подтверждает эффективность подхода в реальных условиях.

В промышленности разрабатываются распределённые системы

автоматического управления дозированием реагентов, учитывающие оперативные данные о ключевых параметрах воды, таких как pH, электропроводность и мутность, с целью поддержания стабильного качества и оптимизации расхода реагентов [3]. Интеллектуальные гибридные системы на базе нейросетей и нечеткой логики позволяют дополнительно снижать избыточное хлорирование и минимизировать образование вредных побочных продуктов [4]. Автономные и цифровые устройства для мониторинга pH обеспечивают непрерывное наблюдение и позволяют моделировать корректирующие воздействия, что критично для предотвращения аварий и обеспечения стабильных условий технологических процессов [5][6].

Контроль качества воды в производстве напрямую зависит от характеристик исходной воды и сырья. Даже незначительные вариации ионного состава или использование различных культур дрожжей могут существенно влиять на органолептические и технологические свойства продукции [7]. Для более широкого экологического контроля применяются методики проектирования сетей мониторинга подземных вод с использованием машинного обучения и суррогатных моделей Кригинга, что позволяет эффективно выявлять потенциально загрязнённые зоны и снижать вычислительную нагрузку [8]. Прогностические модели AutoML на основе больших датасетов позволяют оценивать пригодность воды для питья и интегрироваться в автоматизированные системы мониторинга в реальном времени [9].

Современные программно-аппаратные решения включают использование массивов неселективных сенсоров с перекрёстной чувствительностью для оперативного контроля широкого спектра веществ [10], а также системы поддержки принятия решений на основе индекса WQI для классификации воды и выдачи рекомендаций по обработке [11]. Для управления исполнительными механизмами и дозаторами реагентов

используются специализированные программы с непрерывным контролем корректности операций, обеспечивая надёжность автоматизированных контуров регулирования [12]. Дополнительно, методы озонохемилюминесцентного анализа демонстрируют высокую чувствительность и точность при оценке качества воды и могут быть интегрированы в комплексные системы автоматизации водоподготовки [13].

Таким образом, существующие исследования и разработки показывают значительный потенциал интеграции методов ИИ, сенсорных технологий и интеллектуальных систем управления для повышения точности, оперативности и безопасности контроля качества воды в производственных и экологических процессах.

3. Материалы и методы

Для реализации системы автоматизированного контроля качества воды была разработана прототипная платформа, объединяющая аппаратные и программные компоненты. Система предназначена для мониторинга ключевых параметров воды (в частности pH) в реальном времени и обеспечивает управление процессами дозирования реагентов в водоподготовке.

Аппаратная часть включает датчики физических и химических параметров воды, микроконтроллеры для сбора и передачи данных, исполнительные механизмы дозирования реагентов, а также интерфейсы связи, обеспечивающие интеграцию с верхнеуровневыми системами управления. Программная архитектура построена модульно и включает обработку сигналов с датчиков, принятие решений на основе алгоритмов прогнозирования и искусственного интеллекта, а также интерфейс для оператора.

Разработанная платформа позволяет автоматизировать контроль и

регулирование параметров воды, минимизировать человеческий фактор и интегрировать интеллектуальные модули прогнозирования и корректировки дозировки реагентов. Основная цель архитектуры — обеспечение стабильного качества воды и безопасности технологических процессов при производстве косметической и химической продукции.

Аппаратная платформа системы автоматизированного контроля качества воды построена по принципу модульной интеграции сенсорных и исполнительных компонентов, обеспечивающих сбор данных и управление технологическим процессом. Основными элементами являются:

- промышленный рН-метр, установленный в реакторе для измерений в реальном времени. Датчик поддерживает цифровой интерфейс RS-485 и протокол Modbus RTU, что обеспечивает интеграцию с общей системой управления без необходимости лабораторного отбора проб. Показания рН используются для корректировки дозировки реагентов и прогнозирования отклонений в технологическом процессе;

- датчики температуры и электропроводности воды, обеспечивающие непрерывный мониторинг ключевых физических параметров среды;

- промышленные контроллеры и интерфейсы связи, собирающие сигналы с датчиков, формирующие цифровые данные и передающие их в блок управления;

- исполнительные механизмы, включая насосы-дозаторы и клапаны, осуществляющие автоматическое внесение реагентов в соответствии с рассчитанными дозировками;

- рабочее место оператора, оснащённое интерфейсом для визуализации данных, контроля состояния системы и ручного вмешательства при необходимости.

Конфигурация аппаратной части полностью повторяет структуру прототипной системы дозирования и взвешивания, обеспечивая высокую

точность, надёжность и воспроизводимость операций. Использование промышленного рН-метра в реакторе позволяет контролировать кислотность воды в режиме реального времени, минимизировать риск ошибок и интегрировать систему с алгоритмами прогнозирования и корректировки дозировки реагентов.

Аппаратная структура обеспечивает основу для построения системы прогнозного и адаптивного управления, позволяя оперативно реагировать на изменения качества воды и поддерживать стабильные условия технологического процесса.

Программная архитектура системы автоматизированного контроля качества воды построена по модульному принципу, обеспечивая гибкость, масштабируемость и интеграцию с аппаратной частью. Основные компоненты архитектуры включают:

- модуль операторского интерфейса (HMI/SCADA) — отвечает за визуализацию показаний рН-метра и других сенсоров, отображение последовательности операций, регистрацию действий персонала и взаимодействие с системой управления;

- модуль управления процессом — формирует команды для исполнительных механизмов (насосы-дозаторы, клапаны) и обеспечивает контроль корректного выполнения операций, включая дозировку реагентов на основе текущих показаний сенсоров;

- модуль сбора и обработки данных с датчиков — агрегирует сигналы с рН-метра, датчиков температуры и электропроводности, осуществляет первичную цифровую обработку (сглаживание шумов, фильтрацию и калибровку) и передаёт параметры в блок принятия решений;

- модуль ИИ-аналитики — выполняет прогнозирование отклонений параметров воды, расчёт корректирующих дозровок и адаптивное управление технологическим процессом на основе исторических данных и

временных рядов. Модуль использует алгоритмы машинного обучения и модели LSTM для проактивного контроля качества воды;

- модуль интеграции с исполнительными механизмами - обеспечивает управление насосами-дозаторами, клапанами и другими устройствами, реализуя автоматическое внесение реагентов и блокировку подачи при обнаружении ошибок.

Алгоритм функционирования системы реализован на основе формализации процесса в виде конечного автомата, что обеспечивает строгую последовательность операций, контроль корректности дозирования и интеграцию прогнозных решений модуля ИИ. Программная архитектура поддерживает режимы как автоматического, так и ручного управления, позволяя оператору корректировать процесс при необходимости.

Система обеспечивает сбор и хранение всех технологических данных в централизованной базе, что позволяет вести мониторинг, визуализировать результаты и формировать отчётность. Интеграция с аппаратной частью через цифровые интерфейсы (RS-485 / Modbus RTU) обеспечивает надёжное взаимодействие сенсоров и исполнительных механизмов, что позволяет реализовать адаптивное и прогнозное управление параметрами воды в реальном времени.

Алгоритм процесса контроля качества воды формализован в виде конечного автомата, который включает этапы, показанные на рисунке 1.

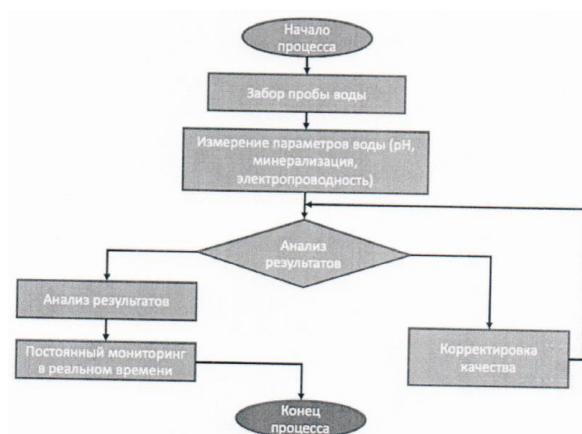


Рисунок 1. Схема процесса контроля качества воды

В системе реализован модуль прогнозирования, позволяющий перейти от реактивного к проактивному управлению качеством воды. На основе данных рН-метра и временных рядов других параметров формируются предиктивные модели, использующие методы машинного обучения (например, LSTM и ARIMA). Это обеспечивает возможность предсказания отклонений ещё до выхода показателей за допустимые пределы и позволяет заранее корректировать процесс дозирования реагентов.

Рассчитанные рекомендации могут применяться автоматически через контроллеры и исполнительные механизмы либо в интерактивном режиме — в виде подсказок оператору. Такой подход минимизирует аварийные ситуации, снижает перерасход реагентов и повышает стабильность водоподготовки.

В результате разработанная программная платформа обеспечивает не только текущее управление процессом водоподготовки, но и интеллектуальную поддержку оператора, что повышает устойчивость, адаптивность и эффективность системы контроля качества воды и дозирования компонентов.

Процесс регулирования качества воды в реакторе имеет дискретный и последовательный характер, что позволяет описывать его средствами конечных автоматов. Такой подход обеспечивает формализацию

алгоритмов управления дозированием реагентов и создаёт основу для интеграции интеллектуальных модулей прогнозирования и поддержки принятия решений.

Рассмотрим дискретную модель системы, представленную в виде конечного автомата $A = (S, \Sigma, \delta, S_0, F)$, где:

- S - множество состояний системы: S_0 - инициализация системы; S_1 - забор пробы / запуск измерительной сессии; S_2 - проведение измерений (рН, электропроводность, минерализация и др.); S_3 - анализ результатов измерений (проверка по порогам и логике правил); S_4 - нормальный режим / постоянный мониторинг (параметры в пределах допусков); S_5 - корректировка качества (расчёт дозировки реагента и её введение); S_6 - повторный контроль (проверка результатов после корректировки); S_7 - блокировка / аварийный останов (при критических отклонениях); S_8 - завершение цикла / ожидание следующей сессии.

- Σ - множество входных символов (событий/условий): a_0 - инициализация завершена успешно; a_1 - проба/сессия забрана / измерения запущены; a_2 - измерения завершены; a_3 - параметры в пределах допусков (ОК); a_4 - обнаружено отклонение (один или несколько параметров вне допусков); a_5 - рассчитана корректирующая акция (доза реагента/режим очистки готова); a_6 - корректировка выполнена (автоматически или вручную); a_7 - результаты повторной проверки в пределах допусков; a_8 - критическое отклонение / невозможность коррекции — перевод в аварийный режим; a_9 - цикл завершён / ожидание следующего измерения.

- $\delta : S \times \Sigma \rightarrow S$ - функция переходов (часть ключевых переходов приведена ниже).

- S_0 - начальное состояние (инициализация).

- $F = \{S_8\}$ - множество завершающих состояний (цикл завершён).

Примеры переходов:

- $\delta(S_0, a_0) = S_1$ (После успешной инициализации - взять пробу / старт

измерений);

- $\delta(S_2, a_2) = S_3$ (По окончании измерений - перейти к анализу результатов);

- $\delta(S_3, a_3) = S_4$ (Если все параметры в пределах - перейти в режим постоянного мониторинга);

- $\delta(S_3, a_4) = S_5$ (Если обнаружено отклонение - перейти к расчёту корректировки);

- $\delta(S_5, a_5) = S_6$ (После расчёта - выполнить корректирующее действие и перейти к повторной проверке);

- $\delta(S_6, a_7) = S_4$ (Если после корректировки параметры нормализованы - вернуться в постоянный мониторинг);

- $\delta(S_6, a_4) = S_5$ (Если отклонение осталось - повторить корректировку);

- $\delta(S_3, a_8) = S_7$ (При критическом отклонении - перевод в аварийный режим с блокировкой процесса);

- $\delta(S_7, a_9) = S_8$ (После завершения аварийных процедур - завершение цикла / ожидание вмешательства);

- $\delta(S_4, a_9) = S_8$ (По окончании мониторинговой сессии - завершение цикла).

Граф состояний процесса контроля качества воды представлен в виде ориентированного ациклического графа на рисунке 3, где вершины отражают возможные состояния системы, а рёбра соответствуют переходам между ними при наступлении определённых условий. Такая структура обеспечивает однозначное и логически согласованное выполнение всех этапов мониторинга и корректировки параметров воды.

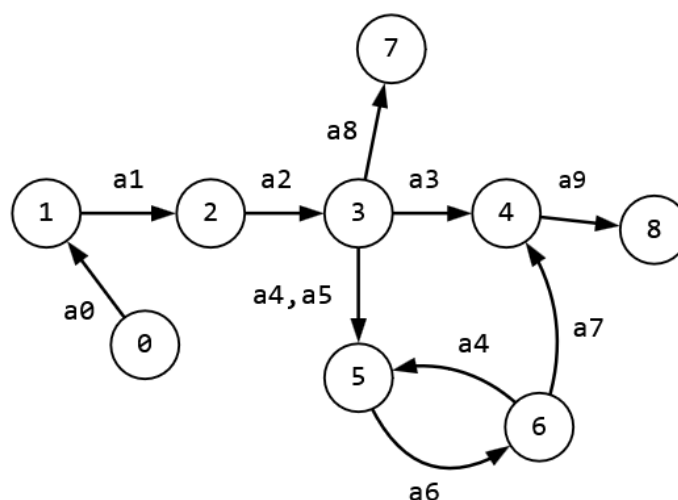


Рисунок 2. Граф состояний процесса контроля качества воды

В традиционных конечных автоматах переходы между состояниями фиксированы и зависят от заранее определённых условий. В рассматриваемой системе часть переходов формируется интеллектуальными модулями, что позволяет адаптировать работу к реальным условиям водоподготовки. Так, соответствие измеренных параметров (рН, электропроводность, минерализация) нормативным значениям проверяется с использованием алгоритмов машинного обучения, которые учитывают исторические данные и особенности текущего цикла. В случае отклонений система определяет объём необходимой корректировки — например, дозу реагента для нормализации кислотности — и инициирует управляющее воздействие либо в автоматическом, либо в полуавтоматическом режиме.

Особое внимание уделяется прогнозированию динамики параметров воды. Для анализа временных рядов применяются модели LSTM, ARIMA и Prophet, что позволяет выявлять потенциальные отклонения до их фактического появления. Благодаря этому система переходит от реактивного подхода к проактивному управлению, предотвращая нарушения технологического процесса и снижая вероятность брака.

Функция переходов автомата расширена до адаптивной $\delta': S \times \Sigma \times M \rightarrow S$, где M — множество рекомендаций, формируемых ИИ-модулем в режиме реального времени. Например, при контроле кислотности анализируется величина $\Delta pH = pH_{\text{Низм}} - pH_{\text{Цел}}$, где $pH_{\text{Цел}}$ определяется моделью с учётом состава и характеристик воды. Цель функционирования автомата заключается в достижении состояния устойчивого качества при минимизации времени и расхода реагентов.

Информационная часть системы строится на данных от сенсоров, подключённых к промышленному контроллеру через Modbus RTU. Сигналы проходят первичную цифровую обработку — фильтрацию шумов, калибровку и нормализацию. Обработанные данные поступают в базу, где используются для обучения моделей и формирования прогнозов. Визуализация параметров реализуется в SCADA-интерфейсе с разграничением прав доступа для оператора, технолога и инженера.

Эффективность системы оценивается по совокупности критериев: точность удержания параметров воды в пределах допустимых значений (погрешность не более $\pm 1\%$), снижение влияния человеческого фактора (сокращение ошибок оператора за счёт автоматической диагностики) и уменьшение перерасхода реагентов на 8–12%.

4. Результаты

Для оценки эффективности разработанной системы контроля качества воды было проведено моделирование на основе дискретной модели конечного автомата с включением адаптивных функций ИИ. Основной задачей эксперимента было сравнение работы системы в двух режимах: а) с использованием ИИ-модуля прогнозирования и корректировки параметров воды; б) без ИИ — с ручным контролем и корректировкой оператором.

Таблица 1 - Результаты моделирования (на 30 циклах)

Показатель	С использованием ИИ	Без использования ИИ
Среднее отклонение pH (ΔpH)	0,05	0,18
Среднее отклонение минерализации (%)	1,1	3,2
Среднее количество корректировок на цикл	1,0	2,7

Разработанная система обеспечивает автоматическое выполнение всех этапов контроля: от отбора проб до анализа и корректировки параметров. Включение ИИ-модуля позволяет предсказывать отклонения, рассчитывать оптимальные дозы реагентов и осуществлять корректировку в реальном времени, минимизируя вмешательство оператора.

Для наглядности была построена сравнительная диаграмма, демонстрирующая сокращение количества ручных корректировок и повышение стабильности параметров воды при использовании интеллектуальной системы (рисунок 3).

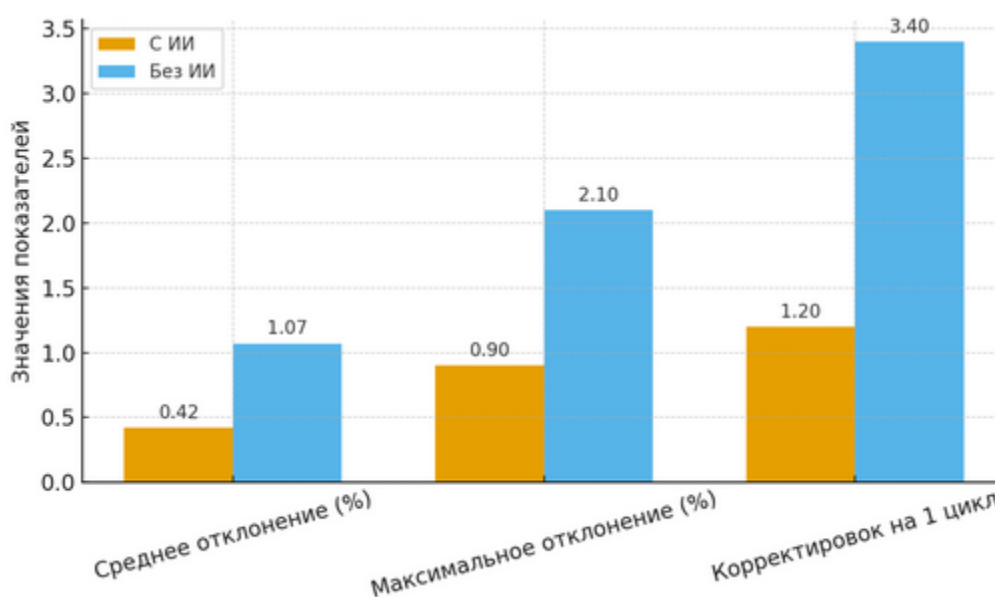


Рисунок 3. Сравнительная диаграмма особенностей интеллектуального управления

ИИ-модуль обеспечивает более стабильное поддержание параметров, жертвуя минимальным дополнительным временем на корректировки. При

ручном управлении возможны задержки и субъективные ошибки оператора, которые могут привести к отклонениям и необходимости повторных вмешательств.

Одним из ключевых эффектов внедрения интеллектуальной системы является снижение риска возникновения несоответствий и брака готовой продукции за счёт своевременной корректировки воды до использования её в технологическом процессе. Для оценки потенциала повышения производственной эффективности были проанализированы основные причины отклонений качества воды и их частота.

Таблица 2 - Основные факторы, влияющие на качество продукции

№	Причина отклонения	Пример/объяснение	Оценочная доля в общем числе отклонений (%)	Устраняется системой?	Комментарий
1.	Ошибки при ручном расчёте доз реагентов	Субъективная оценка количества лимонной кислоты или других реагентов	35	Да	Исключается за счёт автоматического расчёта и дозирования
2.	Задержка лабораторного контроля	Параметры воды меняются пока оператор выполняет измерения	25	Да	Используются сенсоры с измерением в реальном времени
3.	Колебания параметров воды без корректировки	Вода с разной минерализацией и pH	20	Частично	ИИ-модуль адаптирует корректировки, но полностью предсказать все колебания невозможно
4.	Прочие факторы	Температура, человеческий фактор, оборудование	20	нет	Общие производственные риски

На основании анализа можно сделать вывод, что внедрение системы позволяет устранить до 80% основных причин отклонений, ещё около 10–

15% поддаются частичной автоматизированной корректировке, и лишь минимальная доля остаётся вне контроля системы.

Ожидаемое снижение количества отклонений параметров воды с 15–20% до 3–5% подтверждает эффективность интеграции интеллектуального модуля. Дополнительно система сокращает трудозатраты: исключается ручной расчёт корректировок, автоматизируется сбор и анализ данных, отпадает необходимость лабораторного контроля перед каждой корректировкой, минимизируется субъективное участие оператора.

Это критически важно для единой системы рецептурного производства, так как от каждого из звеньев зависит так же и корректировка рецептуры продукта.

В результате внедрение автоматизированной платформы способствует повышению стабильности и воспроизводимости технологического процесса, оптимизации расхода воды и реагентов, а также снижению операционных рисков при производстве косметических продуктов.

5. Заключение

В работе представлена концепция и дискретная модель интеллектуальной системы контроля качества воды, основанная на формализме конечных автоматов. Предложенная архитектура объединяет классические методы автоматизации с инструментами искусственного интеллекта, что позволяет реализовать непрерывный мониторинг параметров и адаптивное управление процессом.

Моделирование показало, что использование ИИ-модуля способствует снижению числа остановок, уменьшению отклонений параметров и повышению стабильности функционирования системы по сравнению с традиционным управлением. Включение адаптивных механизмов коррекции обеспечивает более точное поддержание целевых

значений и снижает вероятность критических сбоев.

Экономический эффект проявляется в уменьшении затрат на устранение брака, оптимизации потребления реагентов и сокращении трудозатрат операторов. При этом полученные результаты основаны на моделировании и требуют экспериментальной проверки в условиях реальной эксплуатации.

В дальнейшем планируется провести промышленную апробацию разработанной системы, расширить базу данных для обучения ИИ-модулей и интегрировать дополнительные параметры контроля (например, электропроводность, мутность и содержание растворённых веществ). Это позволит повысить точность прогнозирования, адаптивность и универсальность решения, а также расширить область его применения в смежных отраслях водоподготовки и технологических производств.

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках проекта № НТИП-24.1

ЛИТЕРАТУРА

1. L'Oréal and IBM announce generative AI model for cosmetic formulations [Электронный источник] – URL: <https://www.personalcareinsights.com/news/loreal-and-ibm-announce-generative-ai-model-for-cosmetic-formulations.html> (Дата обращения: 10.06.2025).
2. Семенова, Т. С. Применение искусственного интеллекта в управлении качеством очистки сточных вод / Т. С. Семенова, М. В. Квиринг, К. А. Гопкин // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО : Материалы Пятьдесят третьей (LIII) научной и учебно-методической конференции, Санкт-Петербург, 29 января – 02 2024 года. – Санкт-Петербург: Национальный исследовательский университет ИТМО, 2024. – С. 293-295. – EDN YEMGLX.
3. Разработка системы автоматического управления станцией дозирования реагентов водооборотных узлов на базе ПЛК Базис-100 / И. В. Прахов, М. Г. Баширов, М. М. Кутлумухаметов, Р. Р. Хакимов // Перспективы науки. – 2020. – № 6(129). – С. 23-27. – EDN ORKSAK.
4. Юхно, А. И. Разработка структуры интеллектуальной информационно-измерительной и управляющей системы контроля дозирования хлорагента и содержания хлороформа в питьевой воде / А. И. Юхно, Н. К. Плуготаренко //

Интеллектуальные системы в производстве. – 2019. – Т. 17, № 4. – С. 48-52. – DOI 10.22213/2410-9304-2019-4-48-52. – EDN HDMOPG.

5. Казанин, В. А. Разработка устройства для сбора данных об уровне pH воды «УСКД-Аква» / В. А. Казанин, Е. В. Ланин // Восемнадцатая Всероссийская конференция студенческих научно-исследовательских инкубаторов, Томск, 05–07 мая 2021 года. – Томск: Общество с ограниченной ответственностью "СТТ", 2021. – С. 30-35. – EDN BHBZDN.

6. Евдокимов, А. П. Исследование изменения уровня кислотности воды в установках замкнутого водоснабжения / А. П. Евдокимов, Р. А. Евдокимов, А. А. Черняев // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2022. – № 2(66). – С. 480-490. – DOI 10.32786/2071-9485-2022-02-58. – EDN BUENQA.

7. Бойко, И. Е. Влияние качества сырья на потребительские свойства пива / И. Е. Бойко, О. В. Мариненко, Т. Э. Лямов // Новые технологии. – 2019. – № 2. – С. 19-27. – DOI 10.24411/2072-0920-2019-10202. – EDN AZEBCJ.

8. Ширяева, М. А. Машинное обучение для мониторинга качества подземных вод / М. А. Ширяева, А. В. Перминов, Т. М. Ряшенцева // Управление рисками в АПК. – 2024. – № S3(53). – С. 534-538. – EDN BSKXOV.

9. Моисеенко, Н. А. Прогнозирование качества воды с использованием машинного обучения / Н. А. Моисеенко, Р. Х. Гагаев, З. Р. Джабраилова // Миллионщиков-2024 : Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием (В рамках реализации программы развития передовой инженерной школы "РосГеоТех"), Грозный, 30 мая 2024 года. – Грозный: Грозненский государственный нефтяной технический университет им. М.Д. Миллионщикова, 2024. – С. 82-87. – EDN PNUJVH.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023686493 Российская Федерация. Программа для устройства контроля состава воды в нефтехимической промышленности : № 2023684902 : заявл. 16.11.2023 : опубл. 06.12.2023 / С. Е. Данилов. – EDN VXNNOS.

11. Карви, Д. К. Разработка экологической системы поддержки принятия решений для оценки качества воды / Д. К. Карви, А. Г. Брусенцев // Научный результат. Информационные технологии. – 2016. – Т. 1, № 4. – С. 35-42. – DOI 10.18413/2518-1092-2016-1-4-35-42. – EDN YMFKOT.

12. Моисеенко, Н. А. Прогнозирование качества воды с использованием машинного обучения / Н. А. Моисеенко, Р. Х. Гагаев, З. Р. Джабраилова // Миллионщиков-2024 : Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием (В рамках реализации программы развития передовой инженерной школы "РосГеоТех"), Грозный, 30 мая 2024 года. – Грозный: Грозненский государственный нефтяной технический университет им. М.Д. Миллионщикова, 2024. – С. 82-87. – EDN PNUJVH.

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021662840 Российская Федерация. Программа управления техническими устройствами в системах автоматизации : № 2021661973 : заявл. 02.08.2021 : опубл. 05.08.2021 / Е. В. Ожогова, В. Ф. Лубенцов, В. И. Левченко [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет». – EDN VXQNUH.

14. Платонов, Д. Г. Контроль качества воды в водных объектах и технологических процессах водоочистки озонохемилюминесцентным методом : специальность 05.23.04 "Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны

водных ресурсов" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Платонов Денис Геннадьевич. – Санкт-Петербург, 2009. – 18 с. – EDN NLFXED.

REFERENCES

1. L'Oréal and IBM announce generative AI model for cosmetic formulations [Jelektronnyj istochnik] – URL: <https://www.personalcareinsights.com/news/loreal-and-ibm-announce-generative-ai-model-for-cosmetic-formulations.html> (Data obrashhenija: 10.06.2025).
2. Semenova, T. S. Primenenie iskusstvennogo intellekta v upravlenii kachestvom ochistki stochnyh vod / T. S. Semenova, M. V. Kviring, K. A. Gopkin // Al'manah nauchnyh rabot molodyh uchenykh Universiteta ITMO : Materialy Pjat'desjat tret'ej (LIII) nauchnoj i uchebno-metodicheskoy konferencii, Sankt-Peterburg, 29 janvarja – 02 2024 goda. – Sankt-Peterburg: Nacional'nyj issledovatel'skij universitet ITMO, 2024. – S. 293-295. – EDN YEMGLX.
3. Razrabotka sistemy avtomaticheskogo upravlenija stanciej dozirovanija reagentov vodooborotnyh uzlov na baze PLK Bazis-100 / I. V. Prahov, M. G. Bashirov, M. M. Kutlumuhametov, R. R. Hakimov // Perspektivy nauki. – 2020. – № 6(129). – S. 23-27. – EDN ORKSAK.
4. Juhno, A. I. Razrabotka struktury intellektual'noj informacionno-izmeritel'noj i upravljajushhej sistemy kontrolja dozirovanija hloragenta i sodержaniya hloroforma v pit'evoj vode / A. I. Juhno, N. K. Plugotarenko // Intellektual'nye sistemy v proizvodstve. – 2019. – T. 17, № 4. – S. 48-52. – DOI 10.22213/2410-9304-2019-4-48-52. – EDN HDMOPG.
5. Kazanin, V. A. Razrabotka ustrojstva dlja sbora dannyh ob urovne pH vody «USKD-Akva» / V. A. Kazanin, E. V. Lanin // Vosemnadcataja Vserossijskaja konferencija studencheskih nauchno-issledovatel'skih inkubatorov, Tomsk, 05–07 maja 2021 goda. – Tomsk: Obshhestvo s ogranichennoj otvetstvennost'ju "STT", 2021. – S. 30-35. – EDN BHBZDN.
6. Evdokimov, A. P. Issledovanie izmenenija urovnja kislotnosti vody v ustanovkah zamknutogo vodosnabzhenija / A. P. Evdokimov, R. A. Evdokimov, A. A. Chernjaev // Izvestija Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie. – 2022. – № 2(66). – S. 480-490. – DOI 10.32786/2071-9485-2022-02-58. – EDN BUENQA.
7. Bojko, I. E. Vlijanie kachestva syr'ja na potrebitel'skie svojstva piva / I. E. Bojko, O. V. Marinenko, T. Je. Ljamov // Novye tehnologii. – 2019. – № 2. – S. 19-27. – DOI 10.24411/2072-0920-2019-10202. – EDN AZEBCJ.
8. Shirjaeva, M. A. Mashinnoe obuchenie dlja monitoringa kachestva podzemnyh vod / M. A. Shirjaeva, A. V. Perminov, T. M. Rjashenceva // Upravlenie riskami v APK. – 2024. – № S3(53). – S. 534-538. – EDN BSKXOV.
9. Moiseenko, N. A. Prognozirovanie kachestva vody s ispol'zovaniem mashinnogo obuchenija / N. A. Moiseenko, R. H. Gagaev, Z. R. Dzhabrailova // Millionshhikov-2024 : Materialy VII Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem (V ramkah realizacii programmy razvitija peredovoj inzhenernoj shkoly "RosGeoTeh"), Groznyj, 30 maja 2024 goda. – Groznyj: Groznenskij gosudarstvennyj neftjanoy tehničeskij universitet im. M.D. Millionshhikova, 2024. – S. 82-87. – EDN PNUJVH.
10. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM № 2023686493 Rossijskaja Federacija. Programma dlja ustrojstva kontrolja sostava vody v neftehimicheskoy promyshlennosti : № 2023684902 : zajavl. 16.11.2023 : opubl. 06.12.2023 /

S. E. Danilov. – EDN VXNNOS.

11. Karvi, D. K. Razrabotka jekologicheskoy sistemy podderzhki prinjatija reshenij dlja ocenki kachestva vody / D. K. Karvi, A. G. Brusencev // Nauchnyj rezul'tat. Informacionnye tehnologii. – 2016. – T. 1, № 4. – S. 35-42. – DOI 10.18413/2518-1092-2016-1-4-35-42. – EDN YMFKOT.

12. Moiseenko, N. A. Prognozirovanie kachestva vody s ispol'zovaniem mashinnogo obuchenija / N. A. Moiseenko, R. H. Gagaev, Z. R. Dzhabrailova // Millionshhikov-2024 : Materialy VII Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh s mezhdunarodnym uchastiem (V ramkah realizacii programmy razvitija peredovoj inzhenernoj shkoly "RosGeoTeh"), Groznyj, 30 maja 2024 goda. – Groznyj: Groznenskiy gosudarstvennyj neftjanoy tehničeskij universitet im. M.D. Millionshhikova, 2024. – S. 82-87. – EDN PNUJVH.

13. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM № 2021662840 Rossijskaja Federacija. Programma upravlenija tehničeskimi ustrojstvami v sistemah avtomatizacii : № 2021661973 : zajavl. 02.08.2021 : opubl. 05.08.2021 / E. V. Ozhogova, V. F. Lubencov, V. I. Levchenko [i dr.] ; zajavitel' Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovanija «Kubanskiy gosudarstvennyj tehnologičeskij universitet». – EDN VXQNUH.

14. Platonov, D. G. Kontrol' kachestva vody v vodnyh ob#ektah i tehnologičeskikh processah vodoočistki ozonohemiljuminescentnym metodom : special'nost' 05.23.04 "Vodosnabzhenie, kanalizacija, stroitel'nye sistemy ohrany vodnyh resursov" : avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehničeskikh nauk / Platonov Denis Gennad'evich. – Sankt-Peterburg, 2009. – 18 s. – EDN NLFXED.