

На правах рукописи



ГРОШЕВ АЛЕКСЕЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ
ОРГАНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ
НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**

2.5.22 Управление качеством продукции.
Стандартизация. Организация производства

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2026

Работа выполнена в Акционерном обществе «Обнинское научно-производственное предприятие «Технология» имени А. Г. Ромашина»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,
заслуженный изобретатель РФ
Харитонов Дмитрий Викторович

Официальные оппоненты: **Гусева Татьяна Валериановна**
доктор технических наук, профессор, федеральное
государственное автономное учреждение «Научно-
исследовательский институт «Центр экологической
промышленной политики», заместитель директора;

Скорнякова Елизавета Алексеевна
кандидат технических наук, федеральное
государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Балтийский
государственный технический университет
«ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова», доцент кафедры
«Программная инженерия и интеллектуальные
системы».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«МИРЭА – Российский технологический
университет», г. Москва.

Защита состоится 29 апреля 2026 года в 12:00 на заседании диссертационного совета 24.2.312.08, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, зал заседаний Ученого совета, А – 330).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» и на сайте <https://www.kstu.ru/servlet/contentblob?id=576099>

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.312.08,
доктор экономических наук, доцент



Кудрявцева
Светлана
Сергеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Производство технической керамики представляет собой значимую отрасль промышленности Российской Федерации, обеспечивающую потребности авиакосмической, металлургической, электронной промышленности и медицины в специальных неметаллических материалах с уникальными свойствами. Изделия технической керамики являются одним из ключевых элементов обеспечения технологического суверенитета страны, что особенно актуально в контексте реализации национальных проектов «Новые материалы и химия», «Цифровая экономика» и Стратегии научно–технологического развития Российской Федерации.

Согласно данным маркетинговых исследований, объем российского рынка технической керамики в 2020 году составил 20,6 млрд рублей с прогнозируемым ростом до 34 млрд рублей к 2030 году, что обусловлено растущим спросом со стороны высокотехнологичных отраслей и необходимостью импортозамещения. При этом доля импорта в сегменте высокотехнологичной керамики достигает 65–70%, что создает критические риски для национальной безопасности и требует незамедлительных мер по развитию отечественного производства.

В условиях санкционного давления, усилившегося с 2014 года и достигшего пика в 2022 году, отрасль столкнулась с существенными ограничениями: разрывом технологических цепочек, сокращением доступа к зарубежному оборудованию и технологиям, необходимостью ускоренного импортозамещения. Анализ текущего состояния производственных систем отрасли свидетельствует о существенном отставании от мирового уровня:

- технологические потери при производстве сложной технической керамики составляют 30–50% против 15–20% у мировых лидеров;
- производительность труда ниже в 2–3 раза по сравнению с ведущими зарубежными предприятиями;
- рентабельность производства большинства предприятий не превышает 8–12%, что недостаточно для масштабной технологической модернизации за счет собственных средств;
- общая эффективность оборудования (ОЕЕ) находится на уровне 60–70% против 85–90% у лучших мировых практик.

Традиционные методы повышения эффективности, основанные на оптимизации отдельных технологических операций и организационных улучшениях, имеют ограниченную эффективность и не способны обеспечить требуемые темпы роста производительности. Существующие системы управления качеством ориентированы на выявление дефектов в конце производственного цикла, что при специфике керамического производства (невозможность исправления дефектов, высокая длительность технологического процесса) приводит к значительным экономическим потерям.

В данном контексте особую актуальность приобретает внедрение технологий Индустрии 4.0, включая системы интеллектуального управления производством на базе методов

машинного обучения, цифровые двойники и предиктивную аналитику. Согласно исследованиям McKinsey Global Institute, данные технологии способны обеспечить рост производительности промышленных предприятий от 20 до 50%, снижение уровня технологических потерь на 30–50%, сокращение внеплановых простоев на 20–40%.

Степень разработанности темы исследования.

Классические подходы и модели управления качеством продукции в связи с концепциями организации производства заложены в трудах Э. Деминга, Дж. Джурана, К. Исикавы, Г. Тагути, а также отечественных ученых В. В. Окрепилова, В. Г. Версана, Ю. П. Адлера, В. А. Васильева, В. А. Козловского, В. Н. Азарова, Б. В. Бойцова, Т. В. Гусевой, С. А. Одицова, В. В. Мирошникова и других исследователей.

Фундаментальные подходы к цифровизации как механизму повышения эффективности организации производств, разработке моделей внедрения цифровых технологий и оценки цифровой зрелости предприятия подробно освещены в работах российских ученых: академика РАН В. П. Мешалкина, профессора Ю. В. Будкина, А. И. Шинкевича, Т. В. Малышевой, М. Е. Михайлова, В. Н. Книгинина, И. Р. Агамризян, Е. А. Скорняковой, Ю. М. Соломенцева, В. Б. Тарасова, академика РАН В. В. Окрепилова, Г. П. Воронина, академика РАН В. Г. Версана, А. И. Белова, А. В. Князева, К. Н. Фазиловой. Среди зарубежных исследователей значительный вклад в данную область внесли Н. Kagermann, W. Wahlster, W. Lukas, K. Schwab, D. Zuhlker, J. Lee, L. Monostory, F. Thoben, J. Wollert, U. Sandler, T. Baumgartner, P. Martinez, K. Lee, F. Müller, T. Schmidt, чьи работы посвящены комплексной цифровой трансформации промышленных предприятий.

Вопросы создания и внедрения цифровых двойников изделий и производственного оборудования, оптимизации параметров технологических процессов и производственных расписаний рассмотрены в трудах А. И. Боровкова, Ю. А. Рябова, И. В. Тарасова, В. П. Куприяновского, Анцыферова С. С., Г. Б. Бурдо, В. В. Кобзева, И. Н. Омельченко, А. В. Колесникова, А. В. Корниенко, Е. Р. Мартынец, В. А. Левенцова, Е. Б. Фролова, Р. Р. Загидуллина, В. В. Макарова. Международный опыт в данной области представлен исследованиями M. Grieves, E. Glaessgen, F. Tao, A. Kusiak, D. Mourtzis, M. Pinedo, P. Brucker, G. Lawler, R. Johnson, Y. Chen, которые разработали теоретические основы и практические подходы к созданию интеллектуальных производственных систем.

В области развития технологий производства керамических материалов значительный вклад внесли отечественные ученые П. П. Будников, Ю. Е. Пивинский, А. Г. Ромашин, Е. И. Суздальцев, Д. В. Харитонов, А. А. Анашкина, А. И. Августинник, У. Д. Кингери, Д. Н. Полубояринов, К. К. Стрелов, Е. С. Лукин, И. Я. Гузман, Н. Н. Круглицкий, чьи работы посвящены фундаментальным аспектам формирования структуры и свойств керамических материалов, исследованию влияния технологических факторов на качество готовой продукции. Среди зарубежных исследователей следует отметить фундаментальные работы R. Coble, F. Norton, J. Reed, R. Brook, K. Nijjara, L. Zhang, R. Rice, H. Schmidt, посвященные специфике керамических производств.

Научная проблема исследования заключается в противоречии между объективной потребностью предприятий керамической отрасли в современных средствах повышения уровня организации производства и управления качеством продукции с одной стороны, и

отсутствием научно обоснованных методов и средств создания систем поддержки принятия решений, основанных на машинном обучении, с другой. Внедрение стандартов управления качеством продукции и организации производства ИСО 9001–2015, ГОСТ РВ 0015–002–2020, ГОСТ Р 54404–2023, ГОСТ Р 50779.11–2000, ГОСТ Р ИСО 14001–2016, ГОСТ Р 57522 и традиционных MES–систем в значительной степени исчерпало ресурс повышения эффективности предприятий. При этом специфика керамического производства, заключающаяся в многостадийности технологического процесса, высокой вариативности параметров сырья, многофакторности процессов, длительности производственного цикла и сложности физико-химических превращений исключает прямое применение типовых решений из смежных отраслей. Отсутствие готовых программно-аппаратных комплексов для управления керамическим производством на базе методов машинного обучения определяет необходимость проведения комплексного исследования в данной области.

Цель и задачи исследования.

Цель исследования – разработка научно-методического аппарата создания и внедрения программно-аппаратного управленческого комплекса (ПАУК) на базе методов машинного обучения для повышения уровня организации производства керамических изделий.

Для достижения поставленной цели в диссертации решаются следующие задачи:

1. Обосновать эффективные направления и модели повышения уровня организации конкурентоспособного керамического производства;
2. Разработать математическую модель прогнозирования качества керамических изделий и выявления источников технологических потерь, способную работать в режиме реального времени и учитывать многофакторную неопределённость производственных условий;
3. Адаптировать цифровые инструменты (систему оперативного управления производством (MES) и систему управления технологическими процессами (SCADA)) к специфике керамического производства с созданием интегрированной системы поддержки принятия оперативных управленческих решений;
4. Апробировать разработанные методы и средства в условиях реального производства с оценкой технических и экономических эффектов внедрения.

Объект исследования – система организации производства технической керамики на ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина в условиях цифровой трансформации.

Предмет исследования – методы и средства повышения уровня организации производства керамических изделий в условиях отраслевых рисков.

Соответствие исследования паспорту научной специальности.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности 2.5.22 Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства в пунктах: п. 22. Разработка методов и средств организации производства в условиях организационно-управленческих, технологических и технических рисков; п. 25. Разработка моделей описания, методов и алгоритмов решения задач проектирования производственных систем, организации производства и принятия управленческих решений в цифровой экономике.

Научная новизна исследования заключается в разработке новых концептуальной и математической моделей, а также алгоритма выявления источников технологических потерь для функционирования системы оперативного принятия управленческих решений, учитывающей специфичные отраслевые риски.

1. Разработана концептуальная модель системы оперативного принятия управленческих решений, отличающаяся от принятой в отрасли реактивной (MES) добавлением модуля прогнозирования на базе методов машинного обучения, интегрированного с цифровым двойником производства, что позволяет осуществлять проактивное управление производственными процессами (п. 25 паспорта специальности 2.5.22).

2. Создана математическая модель прогнозирования качества керамических изделий, отличающаяся составом ансамбля методов машинного обучения, что позволяет повысить точность прогноза в результате учета специфических рисков и факторов керамического производства (п. 22 паспорта специальности 2.5.22).

3. Разработан алгоритм выявления источников технологических потерь в режиме реального времени, отличающийся применением методов интерпретируемого машинного обучения, что позволяет локализовать причины технологических потерь с точностью до отдельной операции (п.25 паспорта специальности 2.5.22).

Теоретическая значимость работы состоит в развитии теории управления производственными системами в части применения методов искусственного интеллекта для многостадийных технологических процессов с высокой вариативностью параметров. Разработанные модели и алгоритмы расширяют методологию проактивного управления применительно к специфике керамического производства.

Практическая значимость работы заключается в создании готового к промышленному внедрению программно-аппаратного комплекса, позволяющего повысить продуктивность труда, снизить уровень технологических потерь и сократить простои оборудования.

Методология и методы исследования.

Методологическую основу исследования составляют системный подход к анализу сложных производственных процессов, теория управления организационно–техническими системами, концепция цифровой трансформации промышленности в рамках парадигмы Индустрии 4.0.

В работе использованы методы системного анализа и математического моделирования для описания производственных процессов, машинного обучения (нейронные сети, градиентный бустинг, решающие деревья, ансамблевые методы) для создания предиктивных моделей; методы математической статистики и эконометрики для обработки экспериментальных данных; методы имитационного моделирования для проверки и оценки разработанных алгоритмов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Концептуальная модель системы оперативного принятия управленческих решений.
2. Математическая модель прогнозирования качества керамических изделий.
3. Алгоритм выявления источников технологических потерь в режиме реального времени.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением апробированных методов исследования, использованием большого объема экспериментальных данных (более 100 000 записей производственных параметров за период 2019–2024 гг.), статистической значимостью полученных результатов ($p < 0,05$ для всех ключевых выводов), а также согласованностью с результатами других исследователей в области промышленного применения методов машинного обучения.

Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях и форумах: Международная научно-техническая конференция «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов» (г. Обнинск, 2019 г.); Международный форум «ИТ в ОПК» (г. Сочи, 2022 г.); Научно-практическая конференция «Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению» (г. Комсомольск-на-Амуре, 2022 г.); Конференция «Цифровые технологии и право» (г. Казань, 2023 г.); II и IV всероссийская конференция «Актуальные тренды цифровой трансформации промышленных предприятий» (г. Казань, 2023 г и 2025 г.).

Проект созданной системы управления качеством стал финалистом всероссийского конкурса «ОЕЕ Award» в номинации «Цифровое управление производством» (2018 г.) и занял 3 место в конкурсе проектов цифровой трансформации IP Week (2020 г.).

Материалы диссертационной работы были использованы для подготовки курса дополнительной профессиональной программы повышения квалификации «Основные инструменты перехода к концепции Индустрии 4.0 в нефтегазовой отрасли» (ФГБОУ ВО «КНИТУ» и Передовая инженерная школа «ПРОМХИМТЕХ»).

Результаты исследования внедрены на АО «ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина» (акт внедрения от 15.09.2025), что подтверждает их практическую значимость.

Личный вклад автора состоит в постановке цели и задач исследования; выборе методов их решения; проведении комплексного анализа факторов, влияющих на качество керамических изделий; разработке концепции адаптивного цифрового двойника и ансамбля методов машинного обучения; непосредственном участии в разработке программного обеспечения; организации и проведении экспериментальных исследований; анализе и интерпретации полученных результатов; внедрении разработанных решений в производственный процесс.

Публикации.

Материалы диссертации опубликованы в 10 научных работах общим объемом 4,88 п.л. (в т.ч. лично автором – 3,51 п.л.), из них 5 статей в журналах из перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных высшей аттестационной комиссией Министерства науки и высшего образования Российской Федерации – «Современные наукоемкие технологии», «Компетентность», «Стандарты и качество». Зарегистрирован патент на изобретение (№2699330 С1 «Программно-аппаратный управленческий комплекс, интегрированный в производство керамических изделий») и 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ (модули «Диспетчеризация», «Сменные задания», «Учет материалов» системы ПАУК).

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 320 источников, глоссария и 5 приложений. Основной текст изложен на 181 странице, содержит 29 рисунков и 33 таблиц. Общий объем работы с приложениями составляет – 245 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, определены объект и предмет исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведён системный анализ производства технической керамики как объекта организационного проектирования. Производственная система изготовления технической керамики представлена в виде иерархической структуры, включающей шесть основных подсистем: подготовку сырья, формование, сушку, обжиг, механическую обработку и контроль качества. Выявлены специфические особенности керамического производства, определяющие требования к его организации: высокая чувствительность качества продукции к параметрам технологических процессов, длительность производственного цикла (от нескольких суток до нескольких недель), многофакторность влияния на качество конечной продукции, необратимость ряда технологических операций и значительная энергоёмкость (затраты на энергоресурсы достигают 35–40% себестоимости). С применением методологии функционального моделирования IDEF0 и нотации BPMN разработаны процессные модели производства и идентифицированы восемь ключевых точек контроля и управления (КТКУ), оказывающих наибольшее влияние на качество продукции.

Проведён анализ мирового опыта организации конкурентоспособного керамического производства на примере ведущих компаний отрасли (CeramTec, Kyocera, NGK, Saint-Gobain, Morgan Advanced Materials). Систематизированы лучшие практики организации производства, включающие: применение концепции бережливого производства (сокращение дефектов на 40%, снижение запасов на 36%), внедрение статистического управления процессами (SPC), использование теории ограничений (ТОС) и метода «барабан–буфер–верёвка» (DBR), а также интеграцию цифровых технологий в соответствии с концепцией «Индустрия 4.0». Особое внимание уделено технологиям промышленного интернета вещей (IIoT) и цифровых двойников, позволяющим прогнозировать проблемы с выходом годной продукции. На основе анализа сформирована концептуальная модель конкурентоспособного керамического производства, интегрирующая лучшие практики организации с современными цифровыми технологиями (рисунок 1).

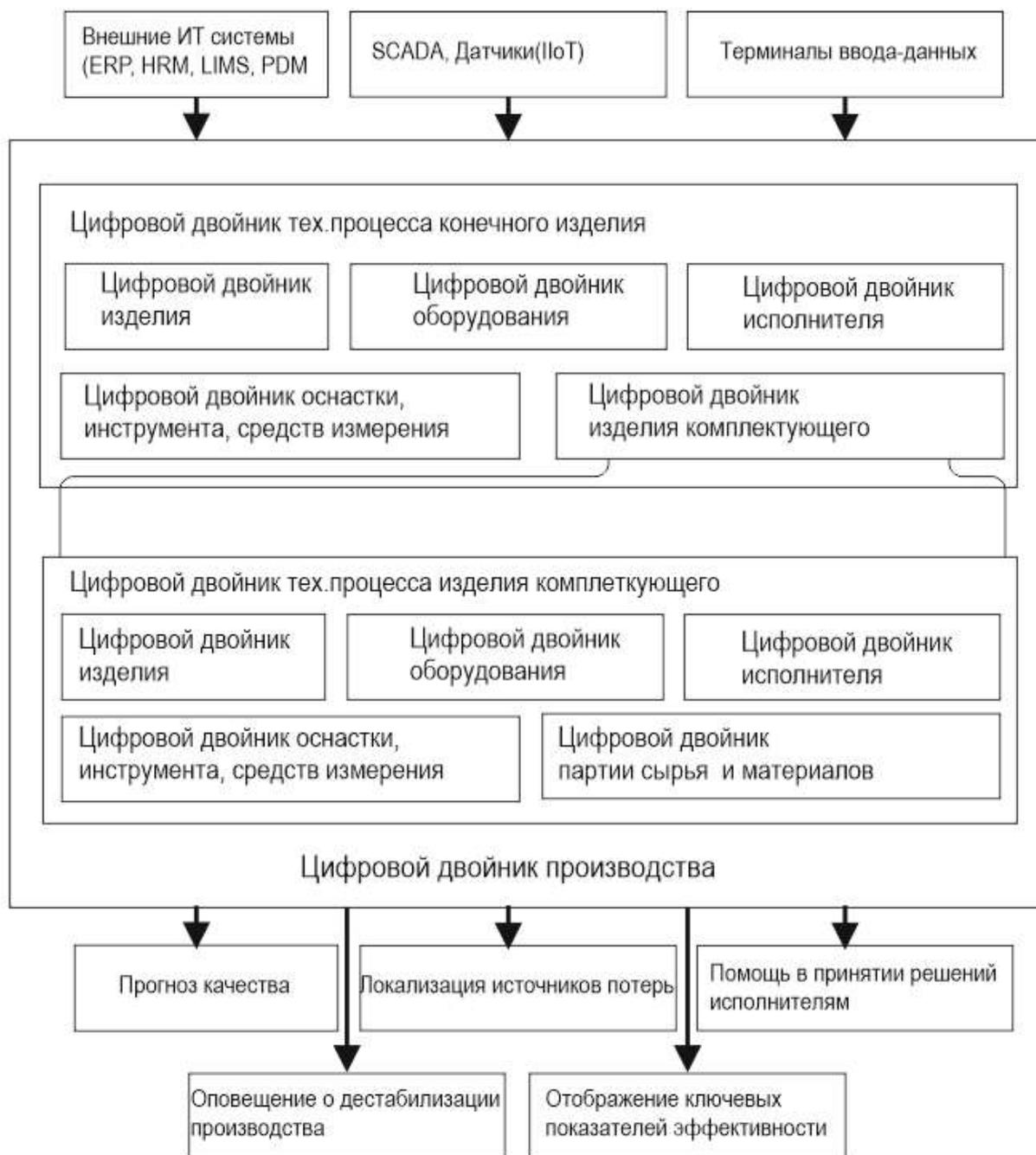


Рисунок 1 – Концептуальная модель системы проактивного управления керамическим производством на основе цифровых двойников (разработана автором)

Выполнена идентификация рисков и источников потерь в производстве технической керамики. С применением методов FMEA и Wow-Tie систематизировано более 20 значимых рисков, классифицированных по категориям (организационные, управленческие, технологические, технические) и стадиям технологического процесса. Наибольшие значения приоритетного числа риска (ПЧР до 180 баллов) получены для операций обжига, что обусловлено высокой значимостью последствий температурных отклонений и необратимостью данной стадии. Построена когнитивная карта взаимосвязей факторов производства и технологических потерь, которая позволила выявить ключевые факторы-

драйверы потерь: нестабильность параметров сырья, отклонения температурно-временных режимов обжига, недостаточная оперативность выявления отклонений и низкий уровень информационного обеспечения принятия решений. Выявлены и систематизированы барьеры внедрения технологий Индустрии 4.0 в керамическом производстве, заключающиеся в высокой вариативности свойств сырья, многофакторности процессов и высокой длительности производственного цикла.

Вторая глава посвящена разработке математической модели прогнозирования качества продукции и выявления источников технологических потерь. Выполнена формализация задачи прогнозирования качества керамических изделий как задачи многокритериальной классификации в условиях стохастической неопределённости параметров. Проведён сравнительный анализ математических подходов (регрессионные модели, нейронные сети, методы машинного обучения, нечёткие системы) по критериям точности, интерпретируемости, устойчивости к шуму и пропускам в данных, быстродействия и адаптивности. Обоснован выбор гибридной архитектуры модели, объединяющей ансамблевые методы машинного обучения и аппарат нечёткой логики.

Разработана математическая модель прогнозирования и оптимизации качественных характеристик керамических изделий на основе ансамбля алгоритмов градиентного бустинга на решающих деревьях (XGBoost) и глубоких нейронных сетей (DNN). Модель обрабатывает 47 входных технологических параметров и прогнозирует 15 показателей качества готовой продукции, достигая точности $R^2 = 0,93$ при сохранении времени отклика менее 300 мс.

Параметры дерева решений: алгоритм XGBoost: `n_estimators`: 1200; `max_depth`: 8; `learning_rate`: 0,03; `subsample`: 0,8; `colsample_bytree`: 0,7; `gamma`: 0,1; `reg_alpha`: 0,05; `reg_lambda`: 1,0. Параметры нейронной сети: тип DNN: входной слой – 47 нейронов; скрытые слои – 256-128-64-32 нейронов; функции активации - ReLU для скрытых слоев, линейная для выходного; регуляризация – Dropout (0,3) и L2-регуляризация (0,001); оптимизатор – Adam с адаптивной скоростью обучения; Batch size – 64; Epochs – 200 с ранней остановкой (patience=20).

Математически задача сводится к поиску функционального отображения:

$$F: X^n \rightarrow Y^m, \quad (1)$$

где $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ – вектор входных параметров ТП ($n = 47$);

$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ – вектор качественных х-к ($m = 15$)

В качестве аппроксимирующей функции качества предложен ансамбль:

1. Предварительная обработка признаков:
$$\tilde{x}_i = \frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i} \quad (2)$$

2. Дерево решений:
$$\hat{y}^{(xGB)} = \varphi(x) = \sum_k^{1K} f_k(x), f_k \in \mathcal{F} \quad (3)$$

Целевая функция:
$$\mathcal{L}(\varphi) = \sum_i l(y_i, \hat{y}_i) + \sum_k \Omega(f_k) \quad (4)$$

Функция потерь:
$$l(y_i, \hat{y}_i) = (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (5)$$

3. Многослойный перцептрон с архитектурой DNN:

$$z^1 = ReLU(W^1 z^0 + b^1) \quad (6)$$

$$z^2 = ReLU(W^2 z^1 + b^2) \quad (7)$$

$$z^3 = ReLU(W^3 z^2 + b^3) \quad (8)$$

$$\hat{y}^{(MLP)} = W_4 z_3 + b_4 \quad (9)$$

слой (dropout) с вероятностью $p = 0.3$:

$$\tilde{z}_1 = z_1 \odot m, \quad (10)$$

где $m_i \sim Bernoulli(1-p)$

и L2-регуляризация весов:

$$\mathcal{L}^{MLP} = MSE(y, \hat{y}^{(MLP)}) + \lambda \sum_i \sum_{ij} W_{ij}^2, \quad (11)$$

Итоговый прогноз:

$$\hat{y} = \alpha \hat{y}^{(xGB)} + \beta \hat{y}^{(MLP)}, \quad (12)$$

где $\alpha = 0,468$ $\beta = 0,532$

Целевая функция качества:

$$Q = \sum_{i=1}^m w_i \cdot q_i(y_i, \hat{y}_i) \rightarrow \max \quad (13)$$

$$q_i(y_i, \hat{y}_i) = e^{-\frac{|y_i - \hat{y}_i|}{\sigma_i}} \quad (14)$$

Верификация математической модели на данных реального производства технической керамики (выборка объемом 4872 записи за период 18 месяцев) подтвердила её адекватность. Достигнуты следующие значения метрик качества: Accuracy – 0,923; Precision – 0,891; Recall – 0,873; F1-score – 0,882; AUC-ROC – 0,954.

Сравнительный анализ с альтернативными подходами (логистическая регрессия, SVM, Random Forest, XGBoost, MLP) показал статистически значимое превосходство разработанной модели ($p < 0,01$ по критерию Уилкоксона) (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты сравнения методов машинного обучения (рассчитано автором)

Метод	RMSE	MAE	R ²	Обучение, мин	F1-score
Линейная регрессия	0,245±0,012	0,189±0,009	0,72±0,03	2,3	0,68±0,04
Случайный лес	0,146±0,008	0,112±0,006	0,84±0,02	8,7	0,81±0,03
Градиентный бустинг – (XGBoost)	0,108±0,006	0,082±0,005	0,89±0,02	12,4	0,88±0,02
DNN	0,128±0,007	0,097±0,006	0,86±0,02	28,5	0,85±0,03
LSTM	0,104±0,006	0,079±0,005	0,90±0,02	47,2	0,89±0,02
Ансамбль (XGB+DNN)	0,087±0,005	0,066±0,004	0,93±0,01	31,2	0,92±0,02

Среднее время единичного прогноза составляет 4,1 мс, что обеспечивает работу в режиме реального времени с существенным запасом. Анализ устойчивости показал сохранение точности прогнозирования на уровне не ниже 0,887 при уровне пропусков в данных до 15%.

В третьей главе произведена адаптация цифровых инструментов MES и SCADA к специфике производства технической керамики. На основе анализа требований к информационному обеспечению установлено, что керамическое производство характеризуется интенсивными информационными потоками, охватывающими данные о параметрах технологических процессов на всех стадиях (подготовка сырья, формование, сушка, обжиг, механообработка), результаты многоуровневого контроля качества и сведения о состоянии оборудования. Выявлены специфические требования к системе сбора данных: повышенная частота мониторинга температурных режимов обжига (1–5 секунд), необходимость интеграции данных лабораторного контроля с оперативными производственными данными, обеспечение надёжности работы оборудования в условиях агрессивной производственной среды. Сравнительный анализ представленных на рынке MES- и SCADA-систем показал наличие функциональных пробелов применительно к керамическому производству, что обосновало необходимость разработки адаптированных решений.

Разработана многоуровневая архитектура интегрированной информационной системы управления производством в соответствии со стандартом ISA-95 (рисунок 2).

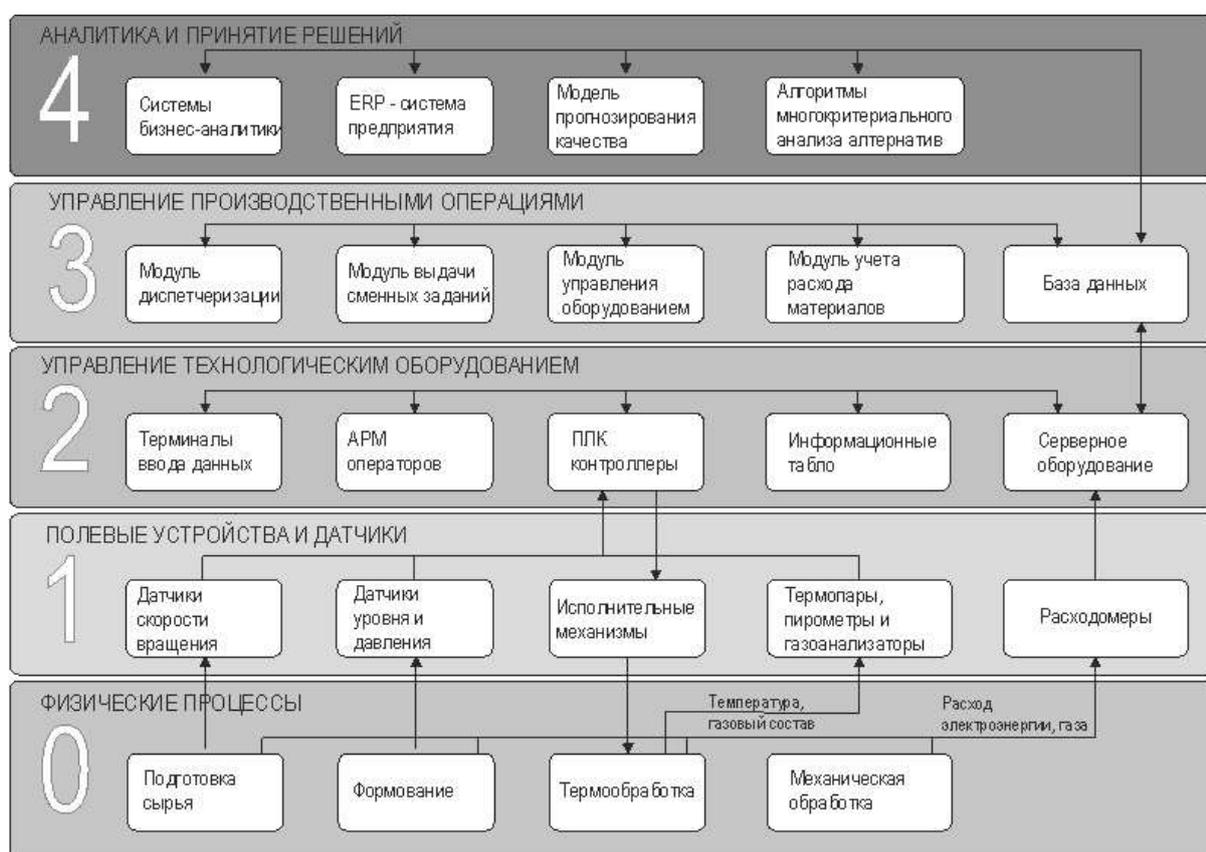


Рисунок 2 – Структурная схема многоуровневой архитектуры информационной системы управления керамическим производством (предложена автором)

Она включает в себя уровень полевых устройств и датчиков, уровень программируемых логических контроллеров, уровень SCADA-систем диспетчерского управления, уровень MES для управления производством и уровень аналитики и поддержки принятия решений. Выполнена адаптация функционала MES-системы, включающая:

модуль диспетчеризации с учётом ограничений технологического процесса керамического производства; модуль учета материалов с формированием генеалогического дерева использованных партий и материалов при производстве продукции; модуль управления качеством с интеграцией математической модели прогнозирования.

Разработана система поддержки принятия оперативных управленческих решений (СППР), включающая пять функциональных подсистем: мониторинга и диагностики, прогнозирования, генерации альтернатив, оценки и формирования рекомендаций. Определены и формализованы типовые ситуации принятия решений: корректировка технологических режимов при отклонениях параметров обжига, сушки и формования; управление загрузкой оборудования при перераспределении партий между печами; реагирование на выявленные отклонения качества с идентификацией источников дефектов.

Разработаны алгоритм формирования рекомендаций, обеспечивающий автоматическое выявление причин отклонений с использованием байесовских сетей доверия, генерацию предложений по корректировке параметров и оценке ожидаемых последствий управленческих воздействий (рисунок 3).

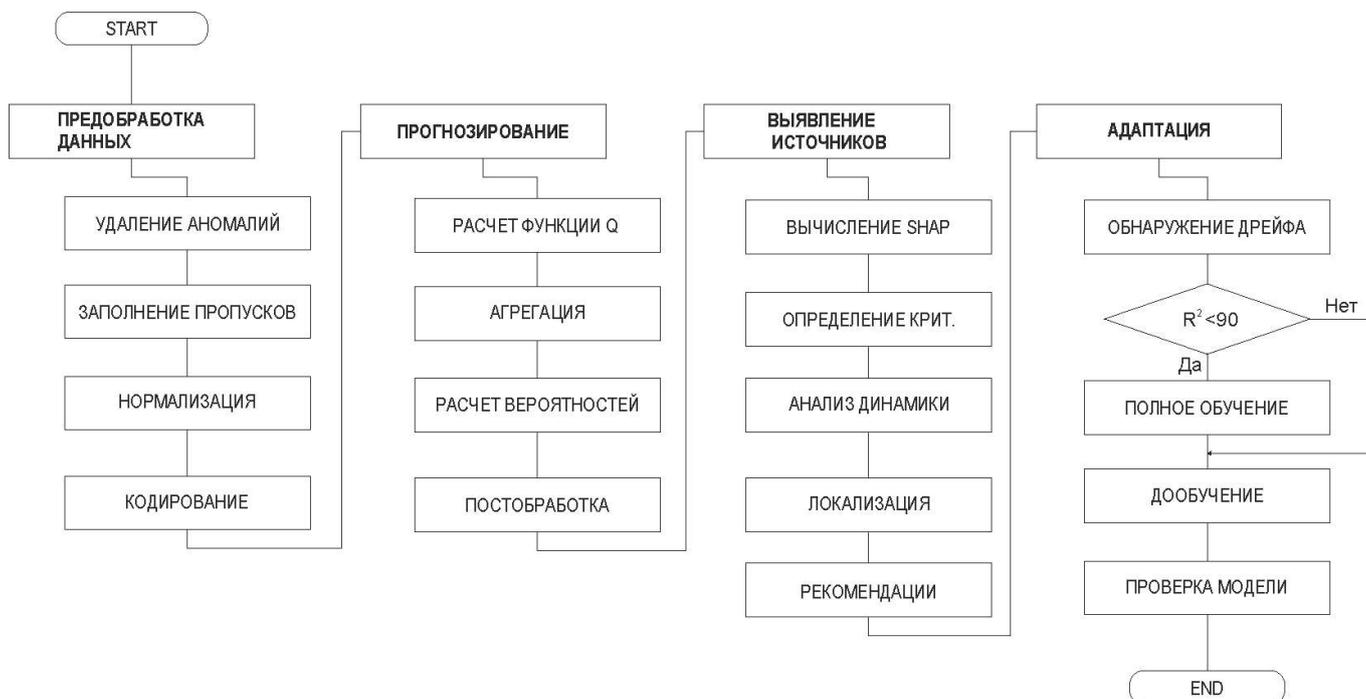


Рисунок 3 – Алгоритм прогнозирования качества керамической продукции (предложен автором)

Реализованы механизмы онлайн-обучения и адаптации к дрейфу данных, обеспечивающие стабильную работу в условиях нестационарных производственных процессов. Комплексная проверка на достоверной тестовой выборке подтвердила достижение целевых показателей полноты прогнозирования и точности классификации возникающих дефектов обеспечивающее снижение уровня технологических потерь, за счет упреждающей корректировки технологических параметров операции.

Разработан оригинальный алгоритм прогнозирования значения функции качества керамической продукции, основанный на модульной архитектуре с адаптивными

механизмами обучения, интегрирующий обработку численных параметров технологического процесса, с учетом пространственного расположения дефектов изделий и изменений значений параметров во времени.

В четвертой главе описан процесс и результаты апробации разработанных методов и средств на базе АО ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина – ведущего отечественного производителя технической керамики, входящего в состав ГК «Ростех». Предприятие специализируется на производстве изделий технической керамики для машиностроительной, электронной и химической отраслей, имеет сертифицированную систему менеджмента качества по ГОСТ Р ИСО 9001–2015 и обеспечивает годовой объём производства около 15 т. изделий технической керамики различной номенклатуры. Апробация проводилась в течение 24 месяцев и включала четыре последовательных этапа: подготовительный, пилотное внедрение, полномасштабное внедрение и стабилизацию.

Схема информационных потоков (рисунок 4) отражает созданный в процессе внедрения единый контур, консолидирующий данные от датчиков и исполнителей в форме цифровых двойников изделий, сырья, оборудования и оснастки, обеспечивая управленческий персонал актуальными данными о состоянии производства, а модули прогнозирования входными параметрами для расчета управляющих воздействий и выдачи рекомендаций.

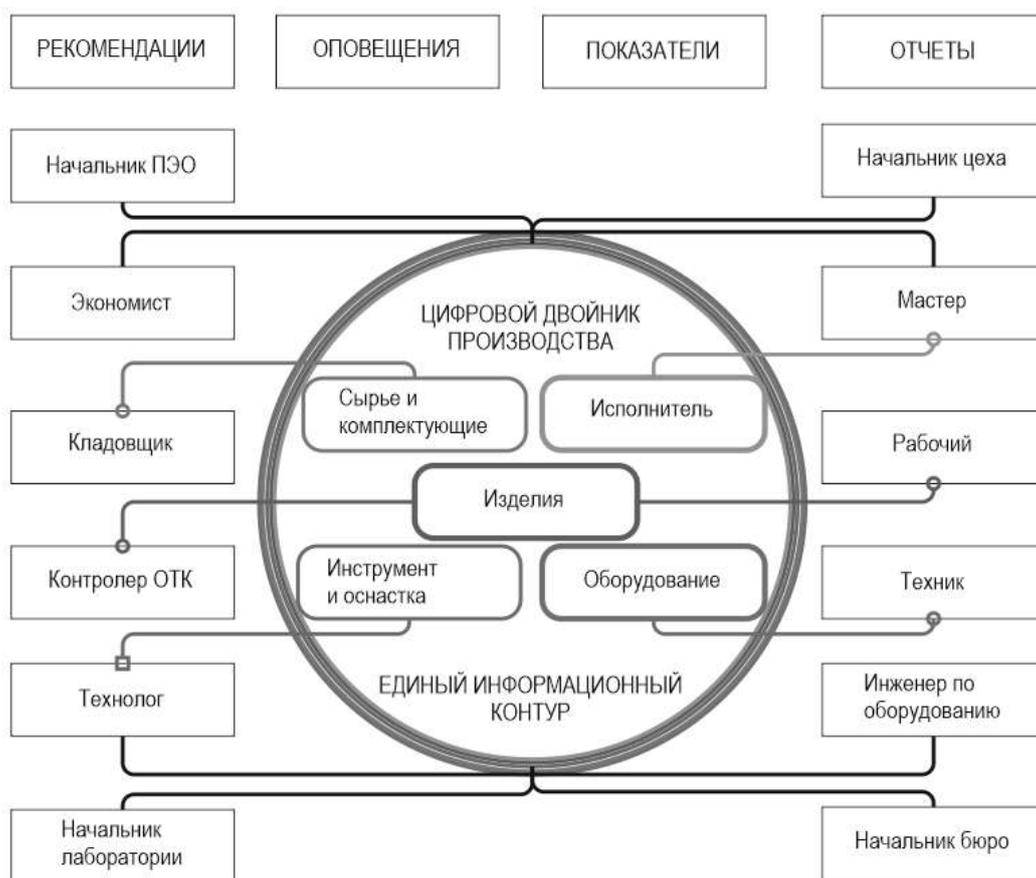


Рисунок 4 – Целевое состояние схемы информационных потоков (составлено автором)

Разработанная система поддержки принятия оперативных управленческих решений была реализована как расширение действующей MES-системы «ПАУК», что обеспечило бесшовную интеграцию с существующей информационной инфраструктурой предприятия.

Для обеспечения удобства работы технологического персонала был разработан специализированный интерфейс системы ПАУК (рисунок 5), предоставляющий оператору в режиме реального времени сводную информацию о выполнении технологических операций с изделием, результатах расчета коэффициента запуска с указанием границ и доверительных интервалов.

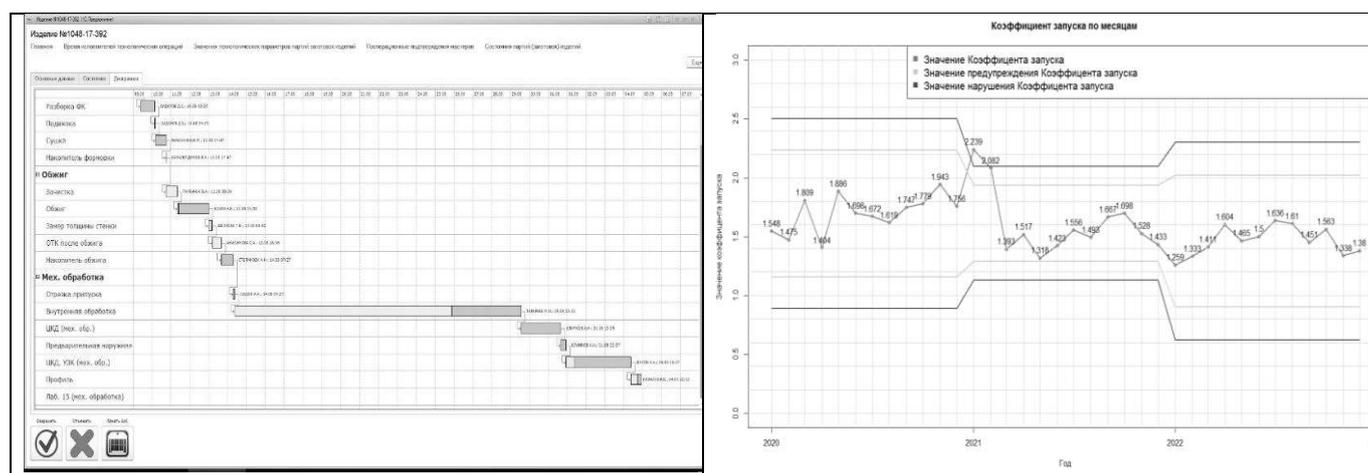


Рисунок 5 – Интерфейс технолога системы ПАУК (составлено автором)

Статистический анализ результатов апробации подтвердил высокую эффективность разработанной математической модели прогнозирования качества. Доля верных рекомендаций по источникам технологических потерь составила 85,4%, при этом наибольшая точность (92,9%) достигнута для категории нарушений температурного режима обжига.

Результаты внедрения системы наглядно отражены в динамике ключевых показателей производства направления «Керамика» ОНПП «Технология» за период 2019–2024 гг. (рисунок 6).

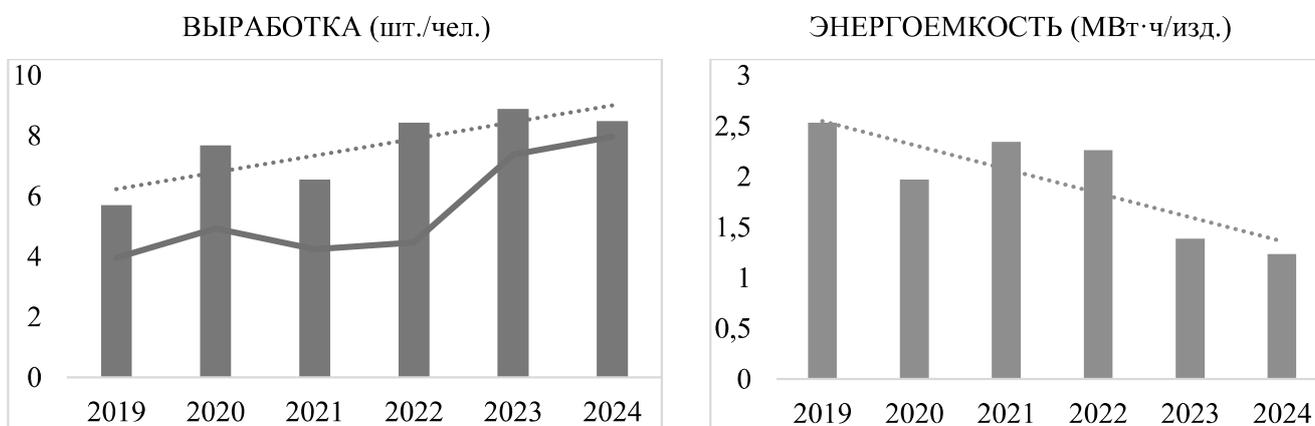


Рисунок 6 – Динамика показателей производства направления «Керамика» ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина (2019–2024 гг.) (составлено автором по данным внутреннего управленческого учета)

Анализ данных внутреннего управленческого учёта показал, что после запуска модуля прогнозирования наблюдается устойчивый рост выработки и снижение энергоёмкости производства, обусловленный сокращением числа повторных обжигов и оптимизацией загрузки печного оборудования.

Таким образом, полученные результаты апробации подтверждают, что внедрение разработанной системы поддержки принятия оперативных управленческих решений обеспечивает измеримое повышение уровня организации производства технической керамики по ключевым показателям эффективности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования разработаны новые научно-обоснованные решения в области повышения уровня организации производства изделий технической керамики путем создания и внедрения системы поддержки и принятия оперативных управленческих решений на основе технологий Индустрии 4.0.

Основные результаты и выводы:

1. В исследовании выполнен системный анализ мирового опыта и научных исследований, выявлены критические проблемы отрасли и обоснована необходимость внедрения инструментов Индустрии 4.0. На основе масштабного исследования современных разработок практики функционирования зарубежных и отечественных предприятий определены эффективные направления повышения уровня организации производства через внедрение систем проактивного управления, применение методов машинного обучения, создание цифровых двойников производственных процессов.

2. В ходе исследования существующих стандартов управления и алгоритмов прогнозирования качества, определены свойства и требования к разрабатываемой концептуальной модели. Создана математическая модель прогнозирования качества керамических изделий на основе гибридного ансамбля методов машинного обучения, общая точность прогнозирования составила 93%, значение F1-score для класса годной продукции достигло 0,92, что на 21 п.п. лучше традиционных методов прогнозирования. Модель позволяет в режиме реального времени (отклик менее 300 мс) прогнозировать 15 показателей качества готовой продукции на основе анализа 47 технологических параметров. Внедрение модели обеспечило снижение уровня технологических потерь с 48% до 30%.

3. Адаптированы цифровые инструменты принятия управленческих решений к специфике керамического производства. Разработан алгоритм выявления источников технологических потерь на основе методов интерпретируемого машинного обучения, позволяющий локализовать причину с точностью до отдельной операции, сократив время расследования с 5 дней до 4,5 ч.

4. Проведена успешная апробация системы принятия управленческих решений на АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина». Система внедрена на 6 производственных участках, 3 испытательных и научно-исследовательских лабораторий, охватив более 100 единиц оборудования.

Рекомендуется применить свойства и требования систем принятия решений при актуализации соответствующих стандартов и разработке стратегий цифровизации компаний и холдингов химической промышленности.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в разработке методов федеративного обучения для объединения опыта нескольких предприятий без передачи конфиденциальных данных, создании автоматизированных систем оптимизации рецептур на основе глубокого обучения, интеграции разработанной системы с роботизированными производственными комплексами, адаптации блокчейн-технологии для обеспечения контроля целостности данных прослеживания изделий особой важности на всех этапах жизненного цикла с последующим совершенствованием существующих стандартов управления качеством и построения систем принятия решений.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ:

1. Грошев, А. В. Интеграция методов машинного обучения в технологические процессы производства технической керамики / А. В. Грошев // Компетентность. – 2025. – №10. – С.35–39. – 0,5 п.л.

2. Грошев, А. В. Цифровая трансформация оборонно-промышленного комплекса: на примере наукоемкого производства керамических изделий / Д. В. Харитонов, А. В. Грошев // Современные наукоемкие технологии. – 2022. – №7. – С.71–77. – 0,6 п.л./0,48 п.л.

3. Грошев, А. В. Оценка производственной эффективности участка формования наукоемких керамических изделий посредством цифровой трансформации процесса учета движения изделий / Д. В. Харитонов, А. В. Грошев // Современные наукоемкие технологии. – 2022. – №6. – С.71–77. – 0,6 п.л./0,48 п.л.

4. Грошев, А. В. Статистическое управление процессом повышения производительности производства наукоемких керамических изделий / Д. В. Харитонов, А. В. Грошев, А. А. Анашкина, Е. В. Маслова // Современные наукоемкие технологии. – 2022. – № 8. – С. 97–102. – 0,6 п.л./ 0,36 п.л.

5. Грошев, А. В. Сокращение потерь при входном контроле / Д. В. Харитонов, А. И. Амосов, А. Н. Блинов, А. В. Грошев, Д. А. Анашкин // Стандарты и качество. – 2019. – № 11. – С. 36–41. – 0,5 п.л./0,3 п.л.

Патент на изобретение:

6. Харитонов Д. В., Грошев А. В., Анашкина А. А., Хамицаев А. С., Русин М. Ю. Программно-аппаратный управленческий комплекс, интегрированный в производство керамических изделий // Патент РФ №2699330 С1. Патентообладатель: ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина. заявл. 06.11.2018. Оpubл. 04.09.2019. Бюл. №25.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

7. Харитонов Д. В., Грошев А. В., Баршевцев С. А., Маслова Е. В., Анашкина А. А. Программный модуль «Диспетчеризация» производственного автоматизированного управленческого комплекса «ПАУК» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022618222. Заявка от 19.04.2022. Зарегистрировано 05.05.2022. Бюл. №5.

8. Харитонов Д. В., Грошев А. В., Баршевцев С. А., Маслова Е. В., Анашкина А. А. Программный модуль «Сменные задания» производственного автоматизированного управленческого комплекса «ПАУК» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022618223. Заявка от 19.04.2022. Зарегистрировано 05.05.2022. Бюл. №5.

9. Харитонов Д. В., Грошев А. В., Баршевцев С. А., Маслова Е. В., Анашкина А. А. Программный модуль «Учет материалов» производственного автоматизированного управленческого комплекса «ПАУК» // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022618221. Заявка от 19.04.2022. Зарегистрировано 05.05.2022. Бюл. №5.

Публикации в других научных изданиях и сборниках материалов конференций:

10. Грошев, А. В. Цифровизация процесса отдельного учета расходов с удельным распределением по контрактам гособоронзаказа / Д. В. Харитонов, А. В. Грошев, А. А. Анашкина, И. В. Мухин // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Экономика и право. – 2022. – № 10. – С. 102–106. – 0,4 п.л./ 0,1 п.л.

11. Грошев, А. В. Применение критерия Пирсона для оценки стабильности технологического процесса / Д. В. Харитонов, А. В. Грошев, А. А. Рамазанова, Е. В. Маслова // Современные наукоемкие технологии. – 2023. – № 9. – С. 61–67. – 0,6 п.л. / 0,36 п.л.

12. Грошев, А. В. Разработка инструментов анализа производственных данных в программно-аппаратном управленческом комплексе, интегрированном в производство керамических изделий / Е. В. Маслова, Д. В. Харитонов, А. В. Грошев [и др.] // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению: материалы научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 07–11 февраля 2022 года. – Комсомольск-на-Амуре, 2022. – С. 124–127. – 0,35 п.л./0,15 п.л.

13. Грошев, А. В. Исследование возможности прогнозирования уровня технологических потерь с помощью критерия Пирсона / А. А. Рамазанова, А. В. Грошев // Актуальные тренды цифровой трансформации промышленных предприятий: Сборник статей II Всероссийской научно-практической конференции, Казань, 20–22 сентября 2023 года. – Курск: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2023. – С. 221–225. – 0,38 п.л./0,2 п.л.

14. Грошев, А. В. Правовые проблемы цифровой трансформации отдельного учета результатов финансово-хозяйственной деятельности при выполнении государственного оборонного заказа / Д. В. Харитонов, И. В. Мухин, А. В. Грошев // Цифровые технологии и право: сборник научных трудов II Международной научно-практической конференции В 6 т., Казань, 22 сентября 2023 года. – Казань: Издательство «Познание», 2023. – С. 312–315. – 0,35 п.л./0,15 п.л.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит руководство и сотрудников АО «ОНПП Технология им. А. Г. Ромашина» за подробное обсуждение, участие в апробации и использование в работе полученных результатов. Сотрудников кафедры логистики и управления ФГБОУ ВО «КНИТУ» за ценные научно-методические, практические советы и организационную поддержку.