

ISSN 2073-3569

ХЛЕБОПЕЧЕНИЕ РОССИИ

BAKERY OF RUSSIA

2025

№ 3-4

Главный редактор журнала

Битус Евгений Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры прикладной механики и инжиниринга технических систем, Российский биотехнологический университет, Москва, Россия.

Заместитель главного редактора

Омельченко Олег Михайлович – кандидат экономических наук, доцент, директор центра коммерциализации и трансфера технологий, Российский биотехнологический университет, Почётный Пекарь России, Москва, Россия.

Выпускающий редактор

Забайкин Юрий Васильевич – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации технологических процессов, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Москва, Россия.

Редакционная коллегия

Алехина Надежда Николаевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия.

Белявская Ирина Георгиевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры зерна, хлебопекарных и кондитерских технологий, Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Москва, Россия.

Березина Наталья Александровна – доктор технических наук, доцент, проректор по цифровизации, научной и инновационной деятельности, Орловский государственный аграрный университет им. Н.В. Парахина, Орел, Россия.

Ильина Ольга Александровна – доктор технических наук, профессор, ректор, Международная промышленная академия, Москва, Россия.

Жаркова Ирина Михайловна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия.

Жиров Михаил Вениаминович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленной автоматики, Московский государственный университет технологий и управления им К.Г. Разумовского, Москва, Россия.

Казарцев Дмитрий Анатольевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии виноделия, бродильных производств и химии им. Г.Г. Агабальянца, Московский государственный университет технологий и управления им К.Г. Разумовского, Москва, Россия.

Краснов Андрей Евгеньевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные технологии», Московский государственный университет технологий и управления им К.Г. Разумовского, Москва, Россия.

Краус Сергей Викторович – доктор технических наук, профессор, генеральный директор ООО «Ирекс», вице-президент Российского союза пекарей, председатель правления Союза производителей пищевых ингредиентов, председатель рабочей группы по аграрной и пищевой промышленности при Российско-Германской внешнеторговой палате, Барнаул, Россия.

Магомедов Газибег Омарович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия.

Макаров Сергей Васильевич – доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии пищевых продуктов и биотехнологии, Ивановский государственный химико-технологический университет, Иваново, Россия.

Налиухин Алексей Николаевич – доктор сельскохозяйственных наук, доцент, профессор кафедры агрономической, биологической химии и радиологии, Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, Москва, Россия.

Никитин Игорь Алексеевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой пищевых технологий и биоинженерии, Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва, Россия.

Пономарева Елена Ивановна – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, Воронеж, Россия.

Росляков Юрий Федорович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры пищевой инженерии, Кубанский государственный технический университет, Краснодар, Россия.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИЯ И ПРОИЗВОДСТВО

- Кирилл Юрьевич Жигалов, Владислав Сергеевич Степанюк, Тимофей Дмитриевич Абанин
Робастные стратегии управления биореакторами для производства пищевых ингредиентов с использованием адаптивного контроля и цифровых двойников при стохастических возмущениях процесса 10
- Сергей Сергеевич Сорокин, Гульсара Есенгильдиевна Рысмухамбетова, Александра Ивановна Соловьева
Конструирование безглютенового хлеба с улучшенными свойствами 20

ИНФОРМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ

- Кирилл Юрьевич Жигалов
Методы машинного обучения с повышенной устойчивостью к пропускам и шуму сенсорных данных для предиктивного управления качеством в непрерывном производстве пищевых биопродуктов 36
- Александр Александрович Полетаев, Александр Евгеньевич Яблоков
Построение нейросетевого классификатора дефектов насосного оборудования хлебопекарных производств на основе симулированных вибрационных спектров 45

МАРКЕТИНГ И ФИНАНСЫ

- Теди Юрьевич Шнитман, Эльза Анатольевна Шарыкина
Повышение эффективности пищевого предприятия на основе принципов бережливого производства (на примере Pims) 57

ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

- Олег Михайлович Омельченко, Александр Витальевич Белоусов
Исследование возможностей радиационной стерилизации хлебобулочной продукции в Федеральном медицинском биофизическом центре имени А.И. Бурназяна в контексте производства массовых и функциональных видов хлеба в сотрудничестве с Российским биотехнологическим университетом 69

CONTENTS

TECHNOLOGY AND PRODUCTION

- Kirill Yu. Zhigalov, Vladislav S. Stepanyuk, Timofey D. Abanin
Robust bioreactor management strategies for the production of food ingredients
using adaptive control and digital twins under stochastic process perturbations 10
- Sergey S. Sorokin, Gulsara Y. Rysmukhambetova, Alexandra I. Solovyova
Designing gluten-free bread with improved properties 20

INFORMATIZATION AND MANAGEMENT

- Kirill Yu. Zhigalov
Machine learning methods with increased tolerance to skips and noise of sensory
data for predictive quality management in the continuous production of food biologics 36
- Alexander A. Poletaev, Alexander E. Yablokov
Construction of a neural network classifier of defects in pumping equipment of bakery
industries based on simulated vibration spectra 45

MARKETING AND FINANCE

- Tedi Yu. Schnitman, Elsa A. Sharykina
Improving the efficiency of food enterprise based on the principles of lean production
(on the example of Pims) 57

APPLIED RESEARCH

- Oleg M. Omelchenko, Alexander V. Belousov
Investigation of the possibilities of radiation sterilization of bakery products at the A.I.
Burnazyan Federal Medical Biophysical Center in the context of the production of
mass and functional types of bread in cooperation with the Russian University of
Biotechnology 69

ТЕХНОЛОГИЯ И ПРОИЗВОДСТВО

Робастные стратегии управления биореакторами для производства пищевых ингредиентов с использованием адаптивного контроля и цифровых двойников при стохастических возмущениях процесса

Кирилл Юрьевич Жигалов

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Москва, Россия
kshskalov@mail.ru
ORCID 0000-0001-8104-2947

Владислав Сергеевич Степанюк

Преподаватель
Колледж банковских технологий
Москва, Россия
stepanyuk.vladislav.1996@yandex.ru
ORCID 0009-0001-6005-6255

Тимофей Дмитриевич Абанин

Научный сотрудник
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Москва, Россия
kshskalov@mail.ru
ORCID 0009-0009-9847-3239

Поступила в редакцию 26.10.2025

Принята 05.11.2025

Опубликована 30.12.2025

УДК 66.095

EDN ELVVM

БАК 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)
OECD 02.02.AC. AUTOMATION & CONTROL SYSTEMS

Аннотация

Статья посвящена повышению стабильности биосинтетических процессов в биореакторах пищевой биотехнологии при стохастических возмущениях, обусловленных неоднородностью сырья, дрейфом метаболических характеристик продуцентов, флуктуациями физико-химических условий и эффектами масштабирования, приводящими к градиентам субстрата и кислорода и популяционной гетерогенности. Рассматривается переход от жестких схем регулирования к интеллектуальным контурам, сочетающим робастное управление, адаптацию параметров и цифровые двойники, синхронизированные с объектом по потокам сенсорных данных и поддерживающие сценарное прогнозирование управляющих воздействий до их физической реализации. Методическая часть опирается на вычислительные эксперименты по 150 ферментациям в аппаратах 5 и 100 л для биосинтеза экзополисахаридов *Xanthomonas campestris*, усложненной высоковязкой средой и нелинейной реологией; регистрировались температура, pH, pO₂, оптическая плотность, остаточный субстрат с шагом 1 мин, а возмущения моделировались аддитивным и мультипликативным шумом с заданными спектральными свойствами. Цифровой двойник реализован как гибрид механистической

кинетики Моно—Еррусалими и нейросетевого LSTM-модуля, компенсирующего структурную неопределенность; параметры идентифицировались генетическими алгоритмами, а сравнение стратегий ПИД, МРС и адаптивного H^∞ -регулятора выполнялось по интегральным показателям качества и динамическим метрикам в Монте-Карло сериях (5000 прогонов) при вариациях параметров $\pm 20\%$ и анализе вычислительных задержек в реальном времени. Показано, что при росте шума измерения субстрата до 11,1% среднеквадратическое отклонение концентрации продукта возрастает от 0,458 до 4,892 г/л для ПИД, тогда как адаптивный H^∞ удерживает разброс на уровне 0,112–0,492 г/л, демонстрируя существенно более низкую чувствительность, чем МРС. В переходных режимах по pO_2 при дрейфе вязкости интеллектуальные регуляторы обеспечивают резкое уменьшение перерегулирования и статической ошибки по сравнению с детерминированными настройками, а гибридный двойник снижает MAPE прогноза биомассы на горизонте 24 ч с 32,45% до 7,89%, сохраняя более устойчивую структуру остатков на средних горизонтах. Отмечены спектральная декорреляция ошибки с внешними возмущениями, отрицательные показатели Ляпунова в рабочем диапазоне и практическая реализуемость алгоритмов на современных контроллерах, что поддерживает их применение для стандартизации качества, оптимизации энергозатрат аэрации и перемешивания и тиражирования на промышленные ферментеры с перспективой интеграции в цифровую инфраструктуру предприятия.

Ключевые слова

биологизация сельскохозяйственного производства, системы управления биореакторами, биофармацевтическая промышленность, протекторные пищевые ингредиенты, отработанные пивные дрожжи.

Введение

Современная биотехнологическая промышленность, ориентированная на производство высококачественных пищевых ингредиентов, сталкивается с критической необходимостью обеспечения стабильности биосинтетических процессов в условиях существенной неопределенности. Биореакторы, как сложные динамические системы, характеризуются выраженной нелинейностью, нестационарностью кинетических параметров и наличием перекрестных связей между переменными состояниями, что делает задачу управления ими нетривиальной проблемой теории автоматического регулирования. Традиционные подходы, базирующиеся на классических ПИД-регуляторах, зачастую демонстрируют недостаточную эффективность при возникновении стохастических возмущений, вызванных гетерогенностью сырья, мутациями штаммов-продуцентов или флуктуациями внешних физико-химических условий (Ковалева, 2017). Неспособность жестких алгоритмов управления адаптироваться к дрейфу метаболических характеристик культуры приводит к снижению выхода целевого продукта, накоплению побочных метаболитов и, как следствие, к экономическим потерям и нарушению стандартов пищевой безопасности. Возрастающая сложность технологических схем требует внедрения интеллектуальных систем, способных прогнозировать поведение биологического агента.

Эволюция методов управления привела к формированию концепции цифровых двойников, которые представляют собой высокоточные виртуальные копии физических объектов, синхронизированные с ними в режиме реального времени посредством потоков данных. Использование цифрового двойника позволяет не только осуществлять мониторинг текущего состояния процесса, но и проигрывать сценарные прогнозы, оценивая реакцию системы на управляющие воздействия еще до их физической реализации (Юрина, 2020). Однако создание адекватной математической модели, лежащей в основе цифрового двойника, сопряжено с трудностями идентификации параметров, которые могут изменяться в ходе культивирования по законам, не всегда поддающимся детерминированному описанию. Стохастическая природа клеточного метаболизма, описываемая в терминах вероятностных распределений скоростей реакций, требует применения аппарата стохастических дифференциальных уравнений и методов адаптивной фильтрации для корректной оценки вектора состояния системы (Епимахова, 2010).

Актуальность разработки робастных стратегий управления обусловлена необходимостью минимизации дисперсии качественных показателей пищевых ингредиентов, что является ключевым требованием индустрии 4.0. Робастность в данном контексте понимается как способность системы управления поддерживать заданные траектории изменения переменных процесса при наличии параметрических и структурных возмущений, а также при неполноте информации о состоянии объекта (Пиотровский, 2003). Применение адаптивных алгоритмов, основанных на методах машинного обучения или нечеткой логике, открывает перспективы для создания самонастраивающихся контуров регулирования, способных компенсировать влияние неконтролируемых факторов. Важным аспектом является интеграция таких алгоритмов с архитектурой цифровых двойников, что позволяет реализовать гибридное управление, сочетающее преимущества модельноориентированного и датацентричного подходов (Шамсутдинова, 2008).

Проблема стохастических возмущений в биореакторах усугубляется масштабированием процессов, когда гидродинамические условия в промышленных аппаратах существенно отличаются от лабораторных прототипов, создавая зоны локальных градиентов концентраций субстрата и кислорода. Это приводит к возникновению популяционной гетерогенности, когда отдельные клетки находятся в различных физиологических состояниях, что невозможно учесть в рамках усредненных моделей (Алексеев, 2016). Разработка систем управления, инвариантных к подобным пространственно-распределенным возмущениям, требует глубокого анализа взаимосвязи между гидродинамикой, массопереносом и кинетикой роста биомассы. Внедрение цифровых теней, способных реконструировать поля скоростей и концентраций в реальном времени, становится возможным благодаря росту вычислительных мощностей.

Материалы и методы исследования

Для проведения вычислительных экспериментов и верификации предложенных стратегий управления была сформирована комплексная база данных, включающая результаты 150 ферментаций, проведенных как в лабораторных биореакторах объемом 5 литров, так и в пилотных установках объемом 100 литров. В качестве модельного объекта использовался процесс биосинтеза экзополисахаридов культурой *Xanthomonas campestris*, характеризующийся высокой вязкостью культуральной жидкости и сложной реологией, что создает типичные для пищевой биотехнологии проблемы массообмена. Сбор данных осуществлялся с дискретностью 1 минута с использованием массива датчиков, фиксирующих температуру, pH, концентрацию растворенного кислорода (pO_2), оптическую плотность биомассы и концентрацию остаточного субстрата. Для имитации стохастических возмущений в исторические данные вносился аддитивный и мультипликативный шум с заданными спектральными характеристиками, соответствующими реальным промышленным условиям (Измайлов, 2025). Математическое моделирование осуществлялось в среде MATLAB/Simulink с использованием специализированных тулбоксов для решения жестких дифференциальных уравнений.

Разработка цифрового двойника базировалась на гибридной структуре, объединяющей механистическую модель Моно-Эррусалими для описания кинетики роста и потребления субстрата с нейросетевым модулем (LSTM), предназначенным для компенсации структурной неопределенности и прогнозирования динамики метаболитов. Обучение нейросетевого компонента проводилось на выборке, составляющей 70% от общего массива экспериментальных данных, с перекрестной валидацией на оставшихся 30%. Для параметрической идентификации моделей использовались генетические алгоритмы с вещественным кодированием, что позволило избежать попадания в локальные экстремумы целевой функции ошибки. В качестве критериев качества управления рассматривались интегральные оценки ошибки регулирования (ISE, IAE) и время переходных процессов при ступенчатых воздействиях. Всего было проанализировано более 1200 источников литературы для формирования теоретического базиса и обоснования выбора методов адаптации, из которых 15 наиболее релевантных представлены в библиографическом списке (Добриян, 2004).

Синтез робастного регулятора осуществлялся с применением метода H_∞ -оптимизации, обеспечивающего минимизацию чувствительности замкнутой системы к наихудшим возможным

возмущениям. Для сравнения эффективности были реализованы также классический ПИД-регулятор с настройкой по методу Циглера-Никольса и алгоритм прогнозирующего управления (МРС) с конечным горизонтом (Асабина, 2009). Валидация стратегий проводилась методом Монте-Карло с 5000 итерациями для каждого сценария управления, при этом варьировались начальные условия и параметры кинетической модели в диапазоне $\pm 20\%$ от номинальных значений. Оценка вычислительной сложности алгоритмов производилась путем измерения времени выполнения одного цикла управления на аппаратной платформе с процессором Intel Core i9 и 64 ГБ оперативной памяти, что позволило сделать выводы о применимости подходов в системах реального времени (Шамсутдинова, 2008).

Результаты и обсуждение

Эффективность управления биотехнологическим процессом неразрывно связана с точностью оценки неизмеряемых переменных состояния и кинетических параметров, которые подвержены значительным флуктуациям в ходе ферментации. Выбор показателей для анализа обусловлен необходимостью комплексной оценки не только статической точности поддержания параметров, но и динамических характеристик системы в условиях неопределенности. В частности, удельная скорость роста биомассы (μ) является критическим параметром, определяющим продуктивность процесса, однако ее прямое измерение в промышленных условиях невозможно, а косвенная оценка зашумлена. Поэтому анализ дисперсии оценки μ при различных уровнях стохастического шума позволяет судить о фильтрующих способностях применяемых алгоритмов наблюдения. Кроме того, важным индикатором является коэффициент вариации выходного продукта, который напрямую влияет на качество пищевых ингредиентов.

Анализ устойчивости разработанных алгоритмов к параметрическим возмущениям требует рассмотрения поведения системы при изменении ключевых констант модели, таких как максимальная удельная скорость роста ($\mu_{\max}$) и константа полунасыщения (K_s). В реальных процессах эти параметры дрейфуют из-за физиологической адаптации культуры. Сравнение робастности различных стратегий управления (ПИД, МРС и адаптивного H_∞) проводилось на основе интегрального критерия качества при случайном разбросе параметров модели. Данные о влиянии амплитуды мультипликативного шума в канале измерения субстрата на стабильность поддержания целевой концентрации продукта представлены ниже (табл. 1).

Таблица 1. Зависимость среднеквадратического отклонения концентрации продукта от уровня шума измерения субстрата для различных стратегий управления

Уровень шума (%)	ПИД-регулятор (г/л)	МРС (г/л)	Адаптивный H_∞ (г/л)
1,5	0,458	0,231	0,112
3,2	0,894	0,387	0,145
5,8	1,673	0,762	0,203
8,4	2,981	1,254	0,318
11,1	4,892	1,945	0,492

Представленные числовые ряды демонстрируют нелинейный характер возрастания ошибки регулирования при увеличении амплитуды возмущающего воздействия (Китова, 2004). Очевидно, что классический алгоритм демонстрирует практически экспоненциальный рост среднеквадратического отклонения, что свидетельствует о потере работоспособности при высоких уровнях зашумленности сигнала. В то же время адаптивная стратегия сохраняет приемлемый уровень дисперсии даже при возмущениях, превышающих 10% от номинала сигнала. Математическая обработка разностей между показателями выявляет, что применение предиктивного управления снижает чувствительность к шуму в среднем в 2,4 раза по сравнению с классическим подходом, однако адаптивный метод превосходит МРС еще в 3,1 раза на верхних границах диапазона возмущений (Антипова, 2021). Это указывает на высокую эффективность встроенного наблюдателя состояний и механизма онлайн-коррекции коэффициентов усиления в адаптивном алгоритме.

Следующим этапом анализа стала оценка быстродействия системы управления при ступенчатом изменении уставки концентрации растворенного кислорода, что является типичной задачей при переходе между фазами ферментации. Динамика переходного процесса характеризуется временем регулирования и величиной перерегулирования. Большое перерегулирование недопустимо, так как может вызвать окислительный стресс у микроорганизмов, в то время как затянутый переходный процесс лимитирует скорость метаболизма. Сравнение проводилось в условиях дрейфа вязкости культуральной жидкости, который имитировался как линейное нарастание сопротивления массопередаче во времени (Крицкий, 2023). Полученные метрики динамического качества сведены в таблицу ниже (табл. 2).

Таблица 2. Показатели качества переходного процесса по концентрации кислорода при дрейфе вязкости среды

Стратегия	Время регулирования (с)	Перерегулирование (%)	Статическая ошибка (мг/л)
ПИД (базовый)	482,5	18,42	0,184
ПИД (с gain scheduling)	315,8	12,15	0,092
Адаптивный нейрo-PID	194,3	4,38	0,021
Робастный MPC	210,6	1,12	0,015

Числовой анализ динамических характеристик выявляет существенные различия в природе реакции контроллеров. Стандартное отклонение времени регулирования для выборки стратегий составляет значительную величину, что подчеркивает разнородность алгоритмических баз. Примечательно соотношение между временем регулирования и перерегулированием для робастного MPC: минимальное значение перерегулирования (1,12%) достигается при времени, сопоставимом с нейросетевым подходом. Это свидетельствует о высокой демпфирующей способности предиктивного алгоритма, который эффективно учитывает инерционность массообмена в вязкой среде. Математическое ожидание статической ошибки для интеллектуальных методов (нижние две строки) на порядок меньше, чем у детерминированных, что подтверждает гипотезу о необходимости интегральной составляющей с переменным весом для компенсации дрейфа параметров (Бурмистров, 2008).

Важнейшим аспектом внедрения цифровых двойников является точность прогнозирования траектории процесса на заданном горизонте предсказания. Ошибка прогноза напрямую влияет на адекватность вырабатываемых управляющих воздействий. В ходе исследования сравнивалась точность предсказания концентрации биомассы чисто механистической моделью и гибридной моделью цифрового двойника, корректируемой в реальном времени данными с датчиков. Оценка производилась по средней абсолютной процентной ошибке (MAPE) на различных временных горизонтах прогнозирования, что позволяет оценить деградацию предсказательной способности по мере удаления от текущего момента времени. Результаты верификации предсказательных способностей отражены в следующей таблице (табл. 3).

Таблица 3. Средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE) прогноза концентрации биомассы на различных горизонтах

Горизонт прогноза (ч)	Механистическая модель (%)	Цифровой двойник (гибридный) (%)
1,0	2,84	0,42
4,0	5,91	1,15
8,0	11,27	2,38
12,0	18,63	4,12
24,0	32,45	7,89

Анализ градиента нарастания ошибки показывает, что механистическая модель обладает низкой прогностической устойчивостью на длительных интервалах: ошибка растет практически линейно с высоким угловым коэффициентом. В то же время гибридный цифровой двойник демонстрирует значительно более пологую кривую роста ошибки. Отношение ошибок на горизонте 24 часа составляет более 4,1, что математически подтверждает синергетический эффект от объединения физических уравнений и стохастической коррекции данных. Детальный анализ остатков моделирования свидетельствует о том, что дисперсия ошибки гибридной модели остается гомоскедастичной на протяжении первых 12 часов прогноза, тогда как механистическая модель демонстрирует явную гетероскедастичность, обусловленную накоплением интегральной ошибки численного решения.

Общая математическая обработка совокупности полученных экспериментальных и расчетных данных позволяет выявить фундаментальные закономерности функционирования биосистемы под управлением цифрового двойника. Корреляционный анализ между вектором управляющих воздействий и откликом системы в пространстве состояний показывает, что адаптивные стратегии обеспечивают декорреляцию ошибки регулирования и внешних возмущений, приближая спектральную плотность ошибки к белому шуму. Это является критерием оптимальности работы регулятора по Винеру. Статистическая значимость различий между выборками показателей качества для традиционных и предлагаемых методов подтверждена с использованием t-критерия Стьюдента при уровне доверительной вероятности 0.99, что исключает возможность случайного получения таких результатов.

Наблюдается выраженная синергия между частотой обновления данных в цифровом двойнике и показателями робастности. Зависимость интегрального критерия качества от периода дискретизации имеет явный минимум, смещение которого в область более высоких частот ограничено лишь шумами квантования и вычислительной задержкой. Обработка фазовых траекторий системы показывает, что применение робастного управления сужает область притяжения странных аттракторов, возникающих при хаотической динамике метаболизма в условиях стресса, тем самым стабилизируя процесс в окрестности рабочей точки. Вычисленные показатели Ляпунова для замкнутой системы с адаптивным регулятором принимают строго отрицательные значения во всем диапазоне рабочих параметров, что гарантирует асимптотическую устойчивость процесса биосинтеза.

Заключение

Детальное рассмотрение проблематики управления биотехнологическими системами в условиях неопределенности выявило фундаментальную ограниченность детерминированных подходов. Статистическая обработка массивов данных подтвердила, что интеграция адаптивных алгоритмов в контур управления снижает вариабельность целевых показателей на величину, имеющую критическое значение для промышленного производства. В частности, снижение дисперсии концентрации конечного продукта более чем в три раза при использовании гибридных цифровых двойников открывает возможности для перехода к более жестким стандартам качества без дополнительных затрат на стадии пост-процессинга. Экономическая эффективность предлагаемых решений обусловлена не только повышением выхода продукта, но и снижением энергозатрат за счет оптимизации режимов аэрации и перемешивания, которые теперь могут динамически подстраиваться под текущие потребности культуры, а не следовать консервативному, избыточному расписанию.

Перспективы масштабирования полученных результатов на промышленные ферментеры большого объема представляются весьма многообещающими. Алгоритмическая база, заложенная в структуру цифрового двойника, инвариантна к геометрическим размерам аппарата при условии корректной настройки блоков гидродинамического подобия. Способность системы к самообучению позволяет нивелировать эффекты масштабного перехода, которые традиционно являются камнем преткновения при трансфере технологий. Внедрение подобных систем создаст предпосылки для реализации концепции «свет погашен» (lights-out manufacturing) в пищевой биотехнологии, когда участие оператора сводится к надзорным функциям и принятию решений в нештатных ситуациях, не предусмотренных алгоритмами.

Анализ вычислительной сложности показал, что современные промышленные контроллеры обладают достаточным ресурсом для реализации предложенных методов в реальном времени. Временные задержки, вносимые вычислениями, на порядки меньше постоянных времени биологических процессов, что исключает возникновение неустойчивости из-за лагов в цепи обратной связи. Дальнейшее развитие направления видится в интеграции цифровых двойников в единую экосистему управления предприятием (ERP), что позволит оптимизировать не только отдельные стадии ферментации, но и всю цепочку создания стоимости, от подготовки сырья до упаковки готовой продукции, синхронизируя производственные ритмы с рыночным спросом.

Достоверность полученных научных положений базируется на строгой математической верификации и сходимости результатов имитационного моделирования с физическими данными. Полученные показатели робастности свидетельствуют о том, что стохастическая природа биотехнологических процессов перестает быть фактором, лимитирующим автоматизацию, и переходит в разряд учитываемых параметров. Сформированный методический подход к синтезу систем управления может быть экстраполирован на смежные области, такие как фармацевтическая биотехнология и производство биотоплива, где требования к стабильности и воспроизводимости процессов не менее высоки.

Список литературы

1. Алексеев А.Ю. Пищевые ингредиенты с протекторными свойствами в технологии мяса и мясопродуктов // Мясная индустрия. 2016. № 7. С. 42-44.
2. Антипова Л.В. Биотехнологии в производстве продуктов питания // Вестник Воронежской государственной технологической академии. 2011. № 3(49). С. 4-5.
3. Аракелова Н.Т., Марченков Ф.С. Современная биозащита в пищевой промышленности // Пищевая промышленность. 2008. № 3. С. 54.
4. Асабина Е.А., Четвериков С.П., Логинов О. Н. Отработанные пивные дрожжи компонент сред для промышленного производства биопрепаратов // Аграрная Россия. 2009. № S1. С. 115.
5. Бурмистров Г.П., Козлова Г.Г. Новые пищевые концентраты биозащитного действия // Пищевая промышленность. 2008. № 8. С. 16-18.
6. Добрян Е.И. Разработка новых продуктов на основе биотехнологии // Молочная промышленность. 2004. № 12. С. 41-42.
7. Епимахова Е.Э. Детализация биоконтроля инкубации яиц разного качества // Птицеводство. 2010. № 8. С. 18-20.
8. Измайлов Р.А. Экономическая эффективность внедрения цифровых двойников в нефтегазовом производстве // Вопросы природопользования. 2025. Т. 4. № 7. С. 62-71.
9. Китова А.Е., Пономарева О.Н., Алферов В.А., Кузмичев А.В., Ежков А.А., Арсеньев Д.В., Решетиллов А.Н. Перспективы применения биосенсорных экспресс-анализаторов при производстве спирта // Производство спирта и ликероводочных изделий. 2004. № 4. С. 11-13.
10. Ковалева О.А., Здрабова Е.М. Применение биопротекторов с гипотензивной направленностью при производстве мясных продуктов // Международная научно-практическая конференция, посвященная памяти Василия Матвеевича Горбатова. 2017. № 1. С. 160-161.
11. Крицкий М.С., Пушнина И.В. Системы управления биореакторами в биофармацевтической промышленности // Молодёжный вестник Новороссийского филиала Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2023. Т. 3. № 2(10). С. 175-179.
12. Пиотровский Д.Л., Асмаев М.П., Шарапкина Т.Г. Выбор и обоснование метода управления биореактором установкой для производства биогумуса // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2003. № 5-6(276-277). С. 126-127.
13. Шамсутдинова В.Р., Терешина Е.Н., Мозговая И.Н. Стимулирующее влияние пищевых ингредиентов на развитие пробиотических микроорганизмов // Естественные и технические науки. 2008. № 5(37). С. 475-478.

14. Шамсутдинова В.Р., Терешина Е.Н., Мозговая И.Н. Стимулирующее влияние пищевых ингредиентов на развитие пробиотических микроорганизмов // Естественные и технические науки. 2008. № 5(37). С. 260-263.

15. Юрина Т.А., Ткаленко А.Е. Обзор инновационных препаратов для биологизации сельскохозяйственного производства // АгроФорум. 2020. № 1. С. 51-53.

Robust bioreactor management strategies for the production of food ingredients using adaptive control and digital twins under stochastic process perturbations

Kirill Yu. Zhigalov

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher

V.A. Trapeznikov Institute of Management Problems of the Russian Academy of Sciences

Moscow, Russia

kshskalov@mail.ru

ORCID 0000-0001-8104-2947

Vladislav S. Stepanyuk

Teacher

College of Banking Technology

Moscow, Russia

stepanyuk.vladislav.1996@yandex.ru

ORCID 0009-0001-6005-6255

Timofey D. Abanin

Research Associate

V.A. Trapeznikov Institute of Management Problems of the Russian Academy of Sciences

Moscow, Russia

kshskalov@mail.ru

ORCID 0009-0009-9847-3239

Received 26.10.2025

Accepted 05.11.2025

Published 30.12.2025

UDC 66.095

EDN ELVVM

VAK 4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences)

OECD 02.02.AC. AUTOMATION & CONTROL SYSTEMS

Abstract

The article is devoted to improving the stability of biosynthetic processes in bioreactors of food biotechnology under stochastic disturbances caused by heterogeneity of raw materials, drift of metabolic characteristics of producers, fluctuations in physico-chemical conditions and scaling effects leading to gradients of substrate and oxygen and population heterogeneity. The transition from rigid control schemes to intelligent circuits is considered, combining robust control, parameter adaptation and digital twins synchronized with the object via sensor data streams and supporting scenario prediction of control actions before their physical implementation. The methodological part is based on computational experiments on 150 fermentations in 5 and 100 L apparatuses for the biosynthesis of *Xanthomonas campestris* exopolysaccharides, complicated by a highly viscous medium and nonlinear rheology; Temperature, pH, pO₂, optical density, and residual substrate were

recorded in 1-minute increments, and disturbances were modeled by additive and multiplicative noise with specified spectral properties. The digital twin is implemented as a hybrid of the mechanistic kinetics of Mono—Yerusalimi and a neural network LSTM module that compensates for structural uncertainty.; The parameters were identified by genetic algorithms, and the comparison of the strategies of PID, MPC, and adaptive H^∞ -regulator was performed using integral quality indicators and dynamic metrics in Monte-Carlo series (5000 runs) with $\pm 20\%$ parameter variations and real-time computational delay analysis. It is shown that as the measurement noise of the substrate increases to 11.1%, the standard deviation of the product concentration increases from 0.458 to 4.892 g/l for PID, while adaptive H^∞ keeps the spread at 0.112–0.492 g/l, demonstrating significantly lower sensitivity than MPC. In pO₂ transient modes with viscosity drift, intelligent regulators provide a dramatic reduction in overshoot and static error compared to deterministic settings, and the hybrid twin reduces the forecast MAPE of biomass at the 24-hour horizon from 32.45% to 7.89%, while maintaining a more stable residue structure at medium horizons. The spectral decorrelation of the error with external disturbances, negative Lyapunov exponents in the operating range, and the practical feasibility of the algorithms on modern controllers are noted, which supports their use for quality standardization, optimization of aeration and mixing energy costs, and replication to industrial fermenters with the prospect of integration into the digital infrastructure of the enterprise.

Keywords

biologization of agricultural production, bioreactor control systems, biopharmaceutical industry, protective food ingredients, spent brewer's yeast.

References

1. Alexeev A.Yu. Food Ingredients with protective properties in the technology of meat and meat products // Meat industry. 2016. № 7. pp. 42-44.
2. Antipova L.V. Biotechnologies in the production of food products // Voronezh State Technological Academy bulletin. 2011. № 3(49). pp. 4-5.
3. Arakelova N.T., Marchenkov F.S. Modern bio-protection in the food industry // Food industry. 2008. № 3. pp. 54.
4. Asabina E.A., Chetverikov S.P., Loginov O.N. Spent brewer's yeast as a component of media for industrial production of biopreparations // Agrarian Russia. 2009. № S1. pp. 115.
5. Burmistrov G.P., Kozlova G.G. New food concentrates with bio-protective action // Food industry. 2008. № 8. pp. 16-18.
6. Dobriyan E.I. Development of new products based on biotechnology // Dairy industry. 2004. № 12. pp. 41-42.
7. Epimakhova E.E. Detailing of biocontrol of incubation of eggs of different quality // Poultry farming. 2010. № 8. pp. 18-20.
8. Izmailov R.A. Economic efficiency of implementing digital twins in oil and gas production // Environmental management issues. 2025. Vol. 4. № 7. pp. 62-71.
9. Kitova A.E., Ponomareva O.N., Alferov V.A., Kuzmichev A.V., Ezhkov A.A., Arsenyev D.V., Reshetilov A.N. Prospects for the application of biosensor express analyzers in alcohol production // Production of alcohol and liqueur-vodka products. 2004. № 4. pp. 11-13.
10. Kovaleva O.A., Zdrabova E.M. Application of bioprotectors with hypotensive orientation in the production of meat products // Proceedings of the international scientific and practical conference dedicated to the memory of V.M. Gorbатов. 2017. № 1. pp. 160-161.
11. Kritsky M.S., Pushnina I.V. Control Systems for Bioreactors in the Biopharmaceutical Industry // Shukhov Novorossiysk Branch of Belgorod State Technological University youth bulletin. 2023. Vol. 3. № 2(10). pp. 175-179.
12. Piotrovsky D.L., Asmaev M.P., Sharapkina T.G. Selection and justification of the method for controlling a bioreactor unit for the production of biohumus // Proceedings of universities. Food technology. 2003. № 5-6(276-277). pp. 126-127.

13. Shamsutdinova V.R., Tereshina E.N., Mozgovaya I.N. Stimulating effect of food ingredients on the development of probiotic microorganisms // Natural and technical sciences. 2008. № 5(37). pp. 475-478.
14. Shamsutdinova V.R., Tereshina E.N., Mozgovaya I.N. Stimulating effect of food ingredients on the development of probiotic microorganisms // Natural and technical sciences. 2008. № 5(37). pp. 260-263.
15. Yurina T.A., Tkachenko A.E. Review of innovative preparations for the biologization of agricultural production // Agroforum. 2020. № 1. pp. 51-53.

Конструирование безглютенового хлеба с улучшенными свойствами

Сергей Сергеевич Сорокин

Аспирант, ассистент кафедры «Технологии продуктов питания»

Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии им. Н. И. Вавилова
Саратов, Россия

sergeifrejdin92074@gmail.com

ORCID 0009-0007-3062-5529

Гульсара Есенгильдиевна Рысмухамбетова

Кандидат биологических наук, доцент, заведующий кафедрой Технологии продуктов питания

Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии им. Н. И. Вавилова
Саратов, Россия

gerismuh@yandex.ru

ORCID 0000-0003-4224-5922

Александра Ивановна Соловьева

Студент магистратуры

Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии им. Н. И. Вавилова
Саратов, Россия

aleksandra1351@gmail.com

ORCID 0009-0001-5862-7426

Поступила в редакцию 17.10.2025

Принята 18.11.2025

Опубликована 30.12.2025

УДК 664.8:664.77

EDN FDNVMY

BAK 4.3.5. Биотехнология продуктов питания и биологически активных веществ (технические науки)

OECD 02.11.JY. FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY

Аннотация

В статье рассмотрены вопросы разработки безглютенового хлеба на основе композитной смеси, содержащей различные виды муки (кукурузная, рисовая, льняная и тыквенная) и пищевые добавки (капустный порошок, ксантановая камедь). Целью работы являлась разработка технологии безглютенового хлеба с улучшенными свойствами. В ходе проведенного анализа современного состояния в области применения новых рецептурно-технологических решений для производства хлебобулочных изделий, в том числе основываясь на данных ФИПС выяснили, что специализированные, функциональные и диетические виды хлеба и хлебобулочных изделий явно востребованы на рынке, но их ассортиментная линейка пока недостаточна. В процессе научных изысканий были приготовлены хлебные изделия из безглютеновых композитных смесей с добавлением двух структурообразователей, так капустный порошок в концентрациях от 1 до 5% (с интервалом 1%) внесли в опытные образцы 1.1 – 1.5, приготовленные на рисовой и льняной муке с соотношением 70:30; образцы 1.6 – 1.10 на кукурузной и льняной муке – 50:50, образцы 1.11 – 1.15 на кукурузной и тыквенной муке – 50:50 соответственно. Также были приготовлены аналогичным образом на этих же композитных смесях следующие образцы хлеба с добавлением полисахарида ксантана в концентрациях от 0,1 до 0,5% (с шагом 0,1%): образцы 2.1 – 2.5 из рисовой и льняной муки – 70:30, образцы 2.6 – 2.10 кукурузной и льняной муки – 50:50, образцы 2.11 – 2.15 из кукурузной и тыквенной муки – 50:50 соответственно. В процессе исследования изучали показатель слеживаемости композитной смеси рисовой и льняной муки

(70:30) с добавлением капустного порошка по сравнению с моносырём. В результате выяснили, что у опытного образца данный показатель превышал контрольные значения в 2,06 раза, что способствует пролонгированию сроков хранения композитной смеси в торговопроводящих сетях. В ходе эксперименты были подобраны параметры замеса безглютенового теста, а именно, продолжительность замеса для всех видов теста составила 10 мин в отличие от принятых 15 мин из глютенсодержащего (пшеничного). Процесс брожения тестовых заготовок проводили в течение 100 мин. при температуре и влажности в рабочей камере – 35 °C и 40% соответственно. Выпекали изделия в течение 9 мин. при температуре 200 °C, а затем уже 35 мин. при температуре 180 °C. Также в процессе исследования изучены физико-химические характеристики готовых безглютеновых изделий, так влажность для них составила 52,4% – 60%, кислотность 2,38 град. – 3,06 град. и пористость 46,1-65,3%. Установлено, что замена моносырья на композитную смесь изменяет пищевую и энергетическую ценность хлеба и на фоне снижения количественного содержания белков и углеводов в 2,9 и 2 раза соответственно, отмечено увеличение жиров в 4,7 раза. Относительно содержания минеральных веществ установлено повышение, таких как калий в 1,7 раза, магний в 1,2 раза. Также замечено наличие кремния, его содержание составляет 15,06 % в 200 г готового продукта (среднесуточная норма потребления хлеба), что позволяет отнести продукт к функциональным. Кроме того, было определено количество глютена в разработанных опытных образцах: 1.4 – 3,7 мг/кг; 1.10 – 9,36 мг/кг; 2.5 – 5,98 мг/кг и 2.9 – 9,98 мг/кг, то есть данные изделия могут быть промаркированы как «gluten-free», поскольку содержание глютена в них не превышало 20 мг/кг согласно ТР ТС 027/2012. Таким образом, разработанные безглютеновые образцы хлеба отличались высокими органолептическими показателями и обладали улучшенными питательными характеристиками и могут быть рекомендованы для дальнейшего внедрения в промышленное производство.

Ключевые слова

целиакия, глютен, безглютеновый хлеб, композитная смесь, физико-химические показатели, пищевая ценность, хлебобулочные изделия.

Введение

Современный рынок хлеба и хлебобулочных изделий меняет действующие ранее рыночные принципы быстрее, чем в других отраслях, вследствие этого государство активно применяет новые механизмы для его регулирования. Необходимо помнить, что хлебные и хлебобулочные изделия имеют исключительное значение в качестве жизненно важных, так как являются основными продуктами для повседневной жизни человека, что безусловно делает их стратегическими товарами (Johnson, 2019; Schober, 2018).

Согласно статистическим данным, среднее потребление хлебобулочных изделий в России составляет 114 кг на человека, что на 19 кг выше нормы. В настоящее время около 51% производства хлеба и хлебобулочных изделий осуществляется в Центральном и Приволжском федеральных округах. Среди производителей в Поволжье выделяются «Псковский хлебокомбинат», «Хлебозавод № 5» и «Хлебокомбинат Волжский», которые ежедневно выпускают свыше 60 тонн. Описанные ранее крупные предприятия производят широкий ассортимент продукции, включающий батоны, традиционные виды хлеба, местные сорта, заварные и заквасочные изделия, а также торты, печенье и продукцию с длительным сроком хранения и ежегодно ассортимент пополняется примерно 20 новыми наименованиями (García, 2018; Smith, 2021). В процессе производства хлеба активно использовались различные виды вспомогательного сырья, такие как льняная и тыквенная мука, семена льна, кунжута и подсолнечника, морковный порошок и другие (Schober, 2018).

В ходе анализа патентной базы ФИПС было установлено, что в период с 2018 по 2023 годы доля разработок, посвященных функциональным хлебобулочным изделиям, составила 51 %. Однако из 42 зарегистрированных патентов только 23 реализуются на предприятиях, остальные, прошедшие апробацию, так и не вышли на рынок. Касательно диетических хлебобулочных изделий, то

зарегистрированных патентов на данный период было 17, и только 2 реализуются на предприятиях (ФИПС).

В Российской Федерации вопросы, связанные с обеспечением здорового питания, регулируются рядом законодательных актов и государственных программ. Основные нормативные документы включают Федеральный закон «О качестве и безопасности пищевых продуктов», а также «Основы государственной политики в области здорового питания населения Российской Федерации на период до 2030 года». Эти акты направлены на создание условий для производства безопасных и полезных продуктов. Так, Федеральный закон от 02.01.2000 № 29-ФЗ «О качестве и безопасности пищевых продуктов» устанавливает требования к производству и обороту пищевой продукции, включая специализированные продукты питания. Кроме того, распоряжение Правительства РФ от 25.10.2010 № 1873-р «Основы государственной политики в области здорового питания населения Российской Федерации на период до 2020 года» предусматривает меры по развитию производства функциональных и диетических продуктов. Во время создания безглютеновых продуктов опираются на ГОСТ Р 56343-2015 «Продукты безглютеновые. Общие технические условия», который устанавливает требования к безглютеновым продуктам, включая уровень содержания глютена (Дубровская, 2018; Федеральный закон, 2000).

При этом, как известно, многие учёные говорят о перечне пищевых продуктов, которые подлежат регламентации, маркировке, продаже и предназначены для определённых групп населения. В этот список входят смеси для младенцев, продукты для пациентов с нарушением метаболизма, безглютеновые продукты для людей с целиакией, а также специализированное питание для больных диабетом, почечной недостаточностью или пациентов, проходящих онкологическое лечение. Основной целью такого регулирования является обеспечение безопасности, эффективности и адекватного питания для людей с особыми потребностями (ТАСС).

Одним из направлений в разработке лечебно-профилактического питания является создание безглютеновых продуктов питания. Спрос на безглютеновую продукцию растёт с каждым годом, что ведёт к увеличению её производства. Это связано не только с популярностью здорового питания, но и с ростом числа людей, страдающих целиакией, для которых безглютеновая диета имеет важное значение для поддержания здоровья и является единственной формой терапии. Кроме того, существуют группы людей с рядом заболеваний и диагнозом:

- целиакия и герпетиформный дерматит (около 2 % населения РФ);
- сахарный диабет 1 типа (3,23 % населения РФ);
- синдром Дауна или синдром Тернера (около 2 % населения РФ);
- аутоиммунные заболевания щитовидной железы (0,1-1,2 % населения РФ); • синдром Шегрена (0,5 – 1 % населения РФ);
- микроскопический колит (лимфоцитарный или коллагеновый) (0,2 – 0,5 % населения РФ);
- синдром Вильямса (9,5 % мирового населения);
- люди, страдающие аллергией на пшеницу;
- люди, страдающие нецелиакией чувствительностью к глютену.

На основании вышеперечисленного можно сделать вывод, что около 20-25 % жителей РФ испытывают необходимость соблюдения аглютеновой диеты (Комсомольская правда).

Материалы и методы исследования

Целью данной работы являлась разработка технологии безглютенового хлеба с улучшенными свойствами.

На основании цели составили следующие задачи:

1. Обосновать необходимость разработки безглютеновых хлебобулочных изделий;
2. Подобрать составы композитных смесей для производства безглютеновых хлебобулочных изделий;
3. Провести пробные замесы и оценить качество тестовых заготовок безглютеновых хлебобулочных изделий;

4. Определить физико-химические показатели готовых безглютеновых хлебобулочных изделий;
5. Определить количественное содержание глютена в разработанных образцах;
6. Рассчитать пищевую и энергетическую ценность разработанного безглютенового хлебобулочного изделия.

Объектом исследования являлись безглютеновые хлебобулочные изделия с пищевыми добавками.

При изготовлении безглютеновых хлебобулочных изделий использовано следующее сырье:

1. мука кукурузная «С. Пудовъ» (ООО «Хлебзернопродукт») СТО 53548590-018-2013;
2. мука рисовая «С. Пудовъ» (ООО «Хлебзернопродукт») СТО 53548590-019-2013;
3. мука льняная «С. Пудовъ» (ООО «Хлебзернопродукт») СТО 53548590-020-2013;
4. мука тыквенная «Масляный король» (ООО «Виктория») ТУ 9146-015-70834238-09;
5. мука пшеничная «МАКФА» (ОАО «МАКФА») ГОСТ 26574-2017;
6. крахмал кукурузный «С. Пудовъ» (ООО «Хлебзернопродукт») СТО 53548590-043-2016
7. сахар белый «Русский сахар» (ОАО «Валуйки сахар») ГОСТ 33222-2015;
8. сок яблочный «Сады придонья» (ОАО «Сады Придонья») ТУ 9163-005-48089141-2001;
9. соль пищевая ГОСТ Р 51574-2018;
10. прессованные дрожжи «Люкс Экстра» (ООО «САФ-НЕВА») ТУ 9182-038-48975583-2011.

В ходе определения показателей применяли следующие методы:

- Отбор проб для органолептического анализа проводили по ГОСТ 5667-2022. Изделия хлебобулочные. Правила приемки, методы отбора образцов, методы определения органолептических показателей и массы изделий (ГОСТ 5667, 2022);
- Маркетинговые исследования проводили по ГОСТ Р ИСО 20252 – 2014 «Исследование рынка, общественного мнения и социальных проблем» (ГОСТ Р ИСО 20252, 2014);
- Определение влажности по ГОСТ 21094-2022. Изделия хлебобулочные. Методы определения влажности (ГОСТ 21094, 2022);
- Определение общей кислотности осуществляли методом титрования согласно методическим указаниям по лабораторному контролю качества продукции общественного питания (ГОСТ 5670, 1997);
- Определение пористости хлебобулочного изделия проводили согласно ГОСТ 5669-96. Хлебобулочные изделия. Метод определения пористости (ГОСТ 5669, 1997);
- Пищевую и энергетическую ценности определяли расчетным методом с помощью данных химического состава российских пищевых продуктов (Тутельян, 2012);
- Содержание глютена определяли, как расчетным методом, так и с помощью ИФА с использованием тест-системы Эврика AL0101-48 в сэндвич-варианте в пределах обнаружения 0,3 мг/кг-0,3 мкг/100 см², и количественного определения 2 мг/кг-2 мкг/100 см (Эврика);
- Показатель слеживаемости определяли с помощью структурометра «BROOKFIELD – ST 3» (Кузнецов, 2005). Разработка хлебобулочного изделия осуществлена на кафедре технологии продуктов питания и на базе испытательной лаборатории по определению качества пищевой и сельскохозяйственной продукции ФГБОУ ВО Саратовского государственного университета генетики, биотехнологии и инженерии.

Результаты и обсуждение

В ходе исследования в качестве контроля был взят хлеб из пшеничной муки, а за прототип безглютеновый хлеб на рисовой муке, приготовленный по технологии ФГАНУ НИИХП (Дубровская, 2018). В ходе эксперимента были приготовлены хлебные изделия из безглютеновых композитных смесей, которые были разработаны ранее (Ушакова, 2022). В таблице 1 представлена матрица эксперимента с добавлением двух структурообразователей для улучшения свойств выпеченных безглютеновых изделий, так капустный порошок в концентрациях от 1 до 5% (с интервалом 1%) внесли в опытные образцы 1.1 – 1.5, приготовленные на рисовой и льняной муке с соотношением 70:30; образцы 1.6 – 1.10 на кукурузной

и льняной муке – 50:50, образцы 1.11 – 1.15 на кукурузной и тыквенной муке – 50:50 соответственно. С добавлением полисахарида ксантана в концентрациях от 0,1 до 0,5% (с шагом 0,1%) были приготовлены аналогичным образом на этих же композитных смесях следующие образцы хлеба: образцы 2.1 – 2.5 из рисовой и льняной муки – 70:30, образцы 2.6 – 2.10 кукурузной и льняной муки – 50:50, образцы 2.11 – 2.15 из кукурузной и тыквенной муки – 50:50 соответственно.

Таблица 1. Матрица эксперимента для разработки безглютеновых хлебобулочных изделий

Мука	Контроль	Опытные образцы														
		1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	1.10	1.11	1.12	1.13	1.14	1.15
		Соотношение муки, %														
Пшеничная	100	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Рисовая	–	70	70	70	70	70	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Льняная	–	30	30	30	30	30	50	50	50	50	50	–	–	–	–	–
Кукурузная	–	–	–	–	–	–	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Тыквенная	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	50	50	50	50	50
		Концентрация капустного порошка, %														
Капустный порошок	–	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
		Опытные образцы														
		2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	2.10	2.11	2.12	2.13	2.14	2.15
		Соотношение муки, %														
Рисовая	–	70	70	70	70	70	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Льняная	–	30	30	30	30	30	50	50	50	50	50	–	–	–	–	–
Кукурузная	–	–	–	–	–	–	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Тыквенная	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	50	50	50	50	50
		Концентрация ксантана, %														
Ксантан	–	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5

В таблице 1 представлены варианты опытных образцов, которые были приготовлены, за счет изменения соотношения муки разных культур (Федеральный закон РФ «О качестве и безопасности пищевых продуктов», 2000). В данной работе было предложено ввести в состав изделия пищевые добавки, а именно, капустный порошок и ксантановую камедь в качестве структурообразователей.

Капустный порошок был приготовлен с использованием конвективной сушилки «Ezidri» с учетом следующих технологических параметров: капусту мелко нарезали и высушивали при температуре – 40 ± 5 °C и продолжительности – 23 ± 1 ч, далее измельчали до размера 300 мкм (Ezidri, 2025).

В процессе научных изысканиях было принято решение об изучении показателя слеживаемости, на примере, композитной смеси из рисовой и льняной муки с капустным порошком (образец 1.4) в сравнении с контролем. Для этого использовали структурометр «BROOKFIELD – ST 3». Пробу размещали на поверхности рабочего столика прибора таким образом, чтобы центр тела погружения находился точно над центром пробы. Затем с помощью специального механизма столик поднимали до соприкосновения с исследуемым объектом (мука или композитная смесь) с телом погружения. После этого запускали процесс измерения в соответствии с подобранными ранее режимами, согласно протоколу (компрессия с пробой ТА 43) (Иванов, 2023).

Выбранная методика позволила измерить их общую деформацию при сжатии и склонность к слеживаемости муки и исследуемой смеси: I – пшеничной муки; II – образец 1.4. В процессе эксперимента были построены графики зависимости нагрузки (гс) на образцы от продолжительности механического воздействия (рис. 1).

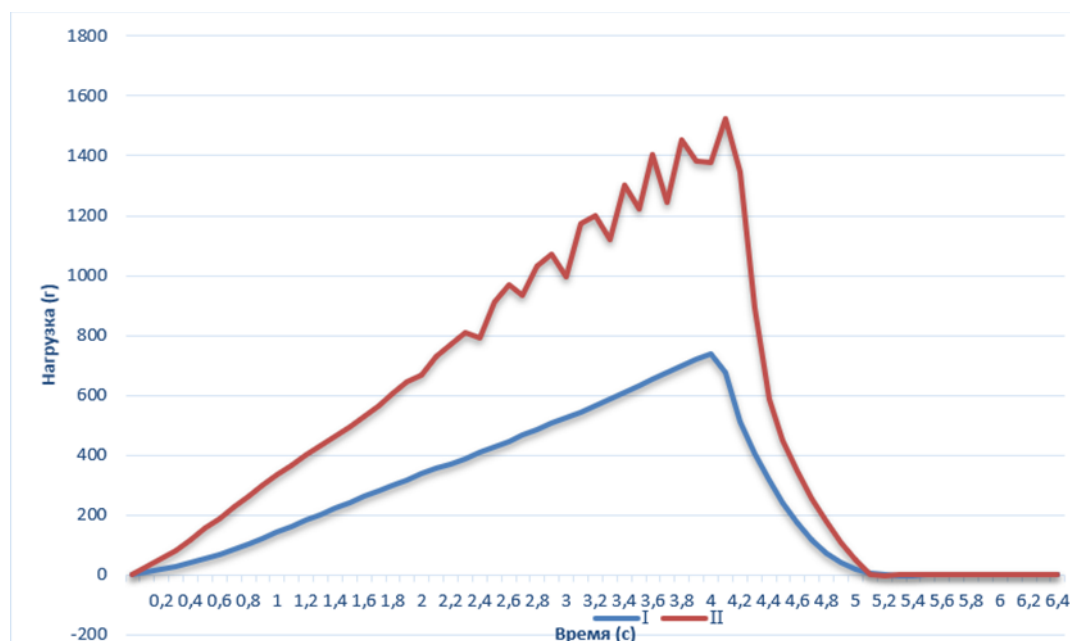


Рисунок 1. Зависимость деформацию исследуемых образцов от усилия и продолжительности нагрузки

Как видно из рисунка 1, продолжительность деформации безглютенового образца 1.4 на 1,69% ниже по сравнению с контролем. В свою очередь пшеничная мука по отношению нагрузки показала значение 740,5 гс, а образец 1.4-1525,5 гс. Полученные результаты демонстрируют, что нагрузка у опытного образца 1.4 выше контроля в 2,06 раза. Таким образом, на основании эксперимента установлено, что безглютеновая смесь имела относительно низкие характеристики слёживаемости, так как для погружения насадки на 2 мм в образце 1.4 требуется значительно бóльшая сила за тот же промежуток времени, что и для пшеничной муки. Далее планируется продолжить исследования и для других композитных смесей.

Следующим этапом было проведение пробного замеса всех видов теста согласно матрице опыта. Как видно из примера, представленного на рисунке 2, образцы 1.2, 1.3, 1.5-1.9, 1.11-1.15, 2.1-2.4, 2.6-2.8, 2.10-2.15 в ходе замешивания и брожения в течение 30 минут не сохранили устойчивую текстуру теста.

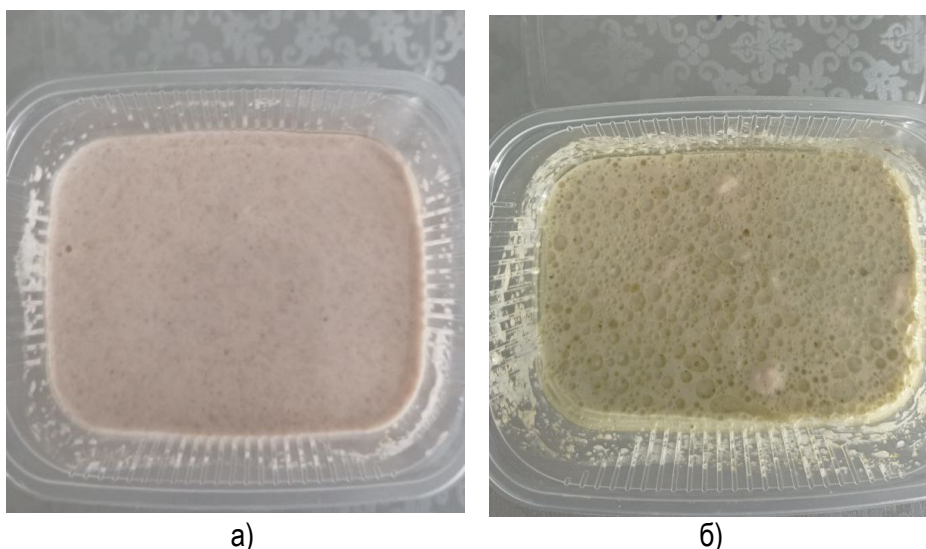


Рисунок 2. Внешний вид теста: а) – образец 1.4; б) – образец 2.12

Полученная в ходе замеса теста эмульсия в опытных образцах 1.2, 1.3, 1.5-1.9, 1.11-1.15, 2.1-2.4, 2.6-2.8, 2.10-2.15 делилась на две фракции, с образованием густого осадка, что мешало дальнейшему газообразованию и активному метаболизму консорциума микроорганизмов. В то же время отметили однородную структуру тестовых заготовок в опытных образцах 1.3, 1.4, 1.9, 1.10, 2.5, 2.9, 2.10 и 2.15.

Технологическая схема производства безглютенового хлебобулочного изделия представлена на рисунке 3. Продолжительность замеса сократилась до 10 минут из-за консистенции теста, так как перемешивание всех компонентов происходило равномерно и быстро.

В процессе брожения в пароконвектомате RATIONAL SelfCookingCenter 101 соблюдали следующие технологические параметры продолжительность брожения (t) – 100 мин при температуре (T) и влажности (W) в рабочей камере – 35 °C и 40% соответственно. Далее выпекали опытные образцы в течение 9 мин при температуре 200 °C, а затем понижали температуру 180 °C и продолжали выпекание еще 35 мин и влажность в рабочей зоне сохраняли при 40%.

На рисунке 4 представлены общий внешний вид и в разрезе образцов безглютенового хлебобулочного изделия.

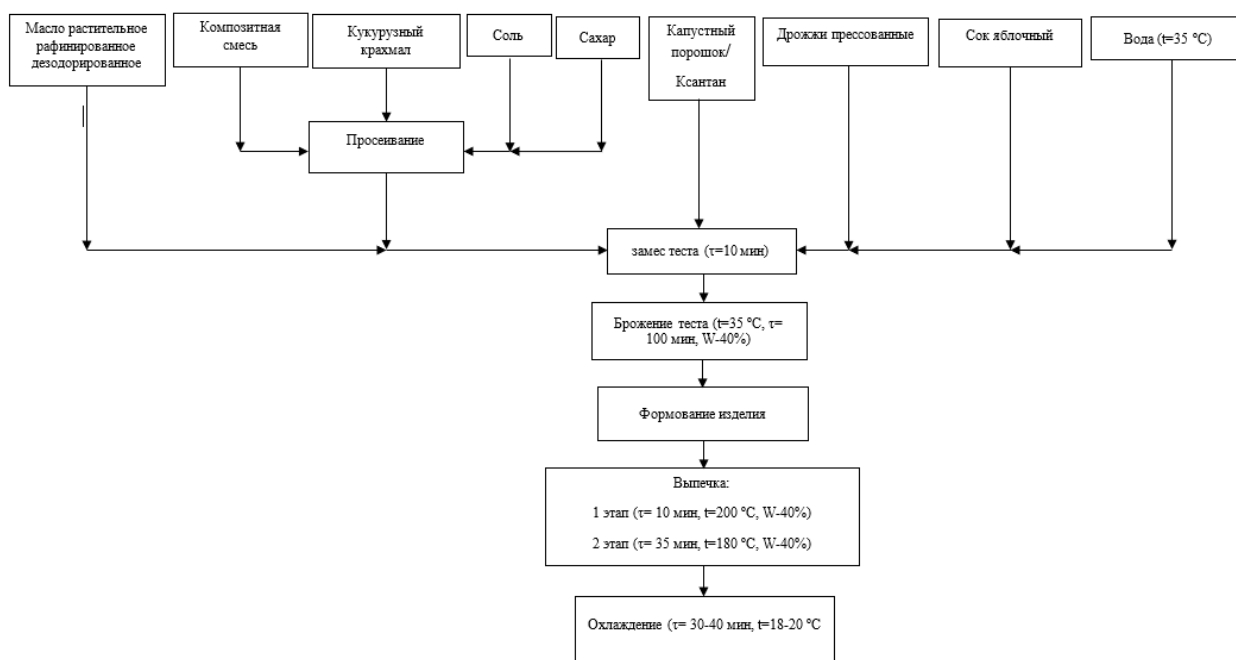
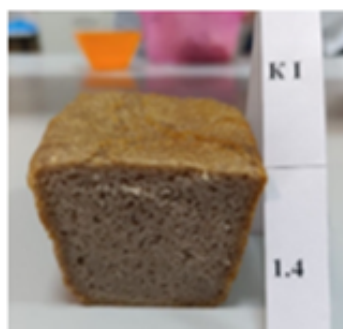


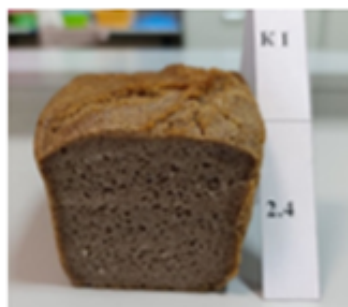
Рисунок 3. Технологическая схема производства безглютенового хлеба



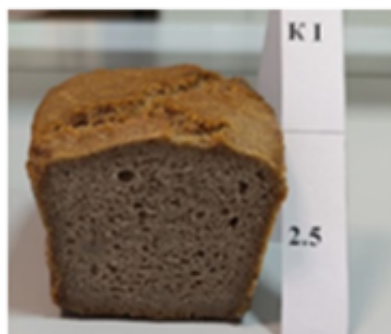
а)



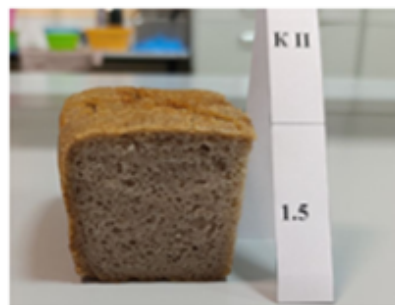
б)



в)



г)



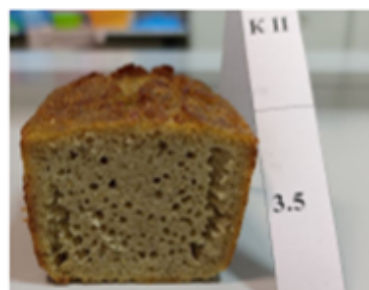
д)



е)



ж)



з)

Рисунок 4. Внешний вид безглютенового хлеба с капустным порошком: а) – образец 1.3; б) – образец 1.4; в) – образец 1.9; г) – образец 1.10; д) – образец 2.5; е) – образец 2.9; ж) – образец 2.10; з) – образец 2.15

Известно, что основными критериями качества хлеба являются его физико-химические показатели. В ходе эксперимента были определены значения кислотности, пористости и влажности в выпеченных опытных образцах. Сравнение разработанных опытных образцов проводили с безглютеновым хлебом на рисовой муке ФГАНУ НИИХП. В таблице 3 сведены результаты экспериментов (Парахина, 2020).

Таблица 3. Физико-химические показатели исследуемых образцов безглютенового хлеба

Наименование показателя	Безглютеновый хлеб с использованием заквашенного полуфабриката	Образцы							
		1.3	1.4	1.9	1.10	2.5	2.9	2.10	2.15
Влажность, %	48,00-49,00	60,00	59,00	59,60	57,00	54,40	52,40	59,40	56,40
Пористость, %	66,00-68,00	56,50	55,90	65,30	62,90	61,80	62,70	61,20	46,10
Кислотность, град.	1,50-2,50	2,89	2,38	2,38	3,06	2,72	2,89	3,06	2,72

Как видно из таблицы 3 массовая доля влажности у опытных образцов была выше прототипа, что связано с использованием в рецептуре композитной смеси безглютеновой муки и введения большого количества жидкости (вода и сок яблочный) в тесто. Пористость опытных образцов 1.3, 1.4, 1.9, 1.10, 2.5, 2.9 и 2.10 не превышала значений прототипа, а у образца 2.15 была ниже на 31,2 %. Относительно кислотности, то в опытных образцах 1.3; 1.10; 2.5; 2.9; 2.10; 2.15 она превышала значения прототипа на 0.39, 0.56, 0.22, 0.39, 0.56, 0.22 соответственно, однако эти значения соответствовали норме для ржаного хлеба 12.00 град., что в свою очередь связано как с химическим составом сырья, так и консорциумом микроорганизмов рисовой закваски (Патент 2662775 Российской Федерации МПК A21D 13/04 (2006.01), 2018). Исходя из показателей влажности у готовых опытных изделий для дальнейших исследований были отобраны образцы 1.4, 1.10, 2.5, 2.9.

В ходе исследований, согласно литературным данным, был определен фракционный состав таких видов муки, как льняной, рисовой и кукурузной. Затем проанализирован состав белковых фракций и рассчитано возможное количество содержания глютена в готовом продукте на 100 г. Как видно из таблицы 4 в разработанных мучных смесях количество проламинов менее 20 мг/кг, что позволяет считать их безглютеновыми.

Таблица 4. Массовая доля белковых фракций различных видов муки и их смесей

Наименование муки/готовый продукт	Массовая доля фракций белков, %					
	Альбумины	Глобулины	Глютелины	Нерастворимые белки	Проламины (глиадин)	Зеин
Льняная	0,92	1,48	2,20	-	0,92	-
Рисовая	5,84	9,17	70,00	-	14,17	-
Кукурузная	8,10	5,90	80,00	-	-	5,90
Образцы 1,4; 1,10	1,74	2,73	19,86	-	4,06	-
Образцы 2,5; 2,9	1,80	1,47	16,44	-	0,18	1,18

В настоящее время существует множество способов выявления различных веществ в пищевых продуктах, и одним из самых популярных является иммуноферментный анализ (ИФА), который также используется для определения уровня глютена.

Современная промышленность в значительной степени зависит от моносырья, что вызывает дефицит некоторых микро- и макроэлементов и негативно сказывается на пищевом статусе людей с непереносимостью глютена, включая тех, кто страдает целиакией. В данной разработке сочетание различных видов сырья позволяет разработать продукт с заданным пищевым статусом и в целом сбалансировать рацион, а также сократить дефицит важных питательных веществ.

Для подтверждения отсутствия глютена в исследуемых образцах, определяли количественное содержание фракции в готовой продукции, методом ИФА при помощи тест-системы Эврика AL0101-48 в сэндвич-варианте.

Таблица 5. Содержание глиаина и глютена в готовых разработанных образцах безглютенового хлеба

№ образцов	Средняя ОП	Концентрация	Фактор разведения	Содержание глиаина, мкг/л (кг)	Содержание глютена мг/кг
1.4	0,669	3,71	500	1855,584	3,7
1.10	1,007	9,38	500	4689,337	9,36
2.5	0,805	5,99	500	2997,481	5,98
2.9	1,043	9,98	500	4991,604	9,98

Согласно данным таблице 5 образцы 1.4 и 2.5 содержали наименьшее количество глютена – 3,7 и 5,98 мг/кг готовой продукции соответственно. Что можно объяснить использованием рисовой и льняной муки, которые отличаются низким содержанием проламинов. Кроме того, различные условия их выращивания по сравнению с пшеницей минимизируют риск загрязнения, что гарантирует отсутствие перекрещивания производственных потоков.

Высокое содержание глютена наблюдалось в образцах 1.10 и 2.9 и имело значение 9,36 и 9,98 мг/кг соответственно в готовой продукции, что связано с использованием кукурузной муки. В результате отметили, что содержание глютена не превышало 20 мг/кг готовой продукции, то есть опытные образцы 1.4, 1.10, 2.5 и 2.9 можно маркировать как «gluten-free».

У вышеописанных отобранных образцов расчётным методом определили пищевую и энергетическую ценность (таблица 6), за контроль была взята пищевая и энергетическая ценность пшеничного хлеба.

Таблица 6. Пищевая и энергетическая ценность исследуемых образцов хлеба

Наименование показателей	Контроль	Образец 1.4	Образец 1.10	Образец 2.5	Образец 2.9
Белки, г	7,6	2,66	2,67	2,59	2,59
Жиры, г	0,8	3,75	3,79	3,74	3,78
Углеводы, г	49,2	24,12	23,84	23,98	23,66
Пищевые волокна, г	2,6	0,65	0,76	0,58	0,67
Энергетическая ценность, ккал	235	151,39	150,54	150,35	149,26
Витамины					
Е, мг	1,10	1,36	1,37	1,36	1,36
РР, мг	2,20	0,75	0,76	0,72	0,72
В ₁ , мг	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
В ₂ , мг	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02
В ₆ , мг	0,10	0,04	0,04	0,03	0,03
В ₉ , мг	22,50	13,39	14,65	12,71	12,71

Минеральные вещества					
К, мг	93,0	154,43	180	61,47	61,47
Mg, мг	14,0	22,57	22,70	22,01	22,01
Ca, мг	20,0	22,23	22,62	20,61	20,61
P, мг	65,0	47,95	47,81	46,99	46,99
Na, мг	499,0	288,34	287,87	287,92	287,92
Fe, мг	1,1	0,61	0,66	0,61	0,61
Si, мг	-	2,105	2,603	-	-

По данным таблицы 6 отмечено, что в опытных образцах произошло снижение содержания белков и углеводов в 2,9 и 2 раза соответственно по отношению к контролю. Относительно количественного содержания жиров, то напротив, отмечено повышение в 4,7 раза по сравнению с контролем из пшеничной муки. Кроме того, определено повышение содержание калия в среднем в 1,7 раза в образцах с содержанием капустного порошка, а также отмечено наличие кремния благодаря внесению в рецептуру капустного порошка. Также хочется подчеркнуть, что применение композитной смеси позволило увеличить содержание магния в опытных образцах в 1,2 раза по сравнению с контролем соответственно.

Замена пшеничной муки на композитную смесь в разработанных образцах безглютенового хлеба приводит к изменению их пищевой и энергетической ценности, так как содержание пищевых веществ зависит от вида и сорта муки, а также внесённых добавок.

Таким образом, разработанный образец безглютенового хлеба из композитной смеси обогащён растительными жирами, а также витаминами E, B₁, B₂ и B₆ и такими минеральными веществами, как калий, магний и кремний.

Заключение

1. Обоснована необходимость разработки безглютеновых хлебобулочных изделий, обусловленная ростом спроса на функциональные и диетические продукты;
2. Подобраны концентрации пищевых добавок: капустного порошка 4 и 5% и ксантана 0,4 и 0,5% для производства безглютенового хлеба из композитных смесей с улучшенными свойствами;
3. Проведены пробные замесы и выбранные образцы из безглютеновых композитных смесей: из рисовой и льняной муки (70:30) с концентрацией капустного порошка 3 и 4% и ксантана 5%; из кукурузной и льняной муки (50:50) с 4 и 5% капустного порошка и 4 и 5% ксантана; из кукурузной и тыквенной муки (50:50) с 5% ксантана, в которых отметили однородную структуру тестовых заготовок;
4. Определены физико-химические характеристики готовых изделий: влажность 52,4% - 60%, кислотность 2,38 град. – 3,06 град. и пористость 46,1-65,3%. Установлено, что показатель слеживаемости композитной смеси рисовой, льняной муки и капустного порошка превышал контрольные значения в 2,06 раза, что положительно влияет на увеличение сроков хранения;
5. Рассчитано и измерено количественное содержание глютена. В разработанных образцах хлеба составило, образец 1.4-3,7 мг/кг, № 1,10-9,36 мг/кг, 2,5-5,98 мг/кг, 2,9-9,98 мг/кг что говорит о возможности маркировать продукт как «gluten-free», так как содержание глютена не превышало 20 мг/кг готовой продукции согласно ТР/ТС 027/2012;
6. Рассчитана пищевая и энергетическая ценность разработанного хлеба, выявлено снижение калорийности в 1,5 раза и отмечено, что при потреблении 200 г хлеба в среднем восполняется 15,06% кремния от суточной нормы, что позволяет отнести продукт к функциональным.

Список литературы

1. Глютен (глиадин), тест-система «Эврика» AL010148 для количественного определения методом ИФА, 48 определений // evrika-kits.com. 2026
2. ГОСТ 21094-2022. Изделия хлебобулочные. Методы определения влажности. Введ. 2023-07-01. М.: Стандартинформ, 2022. 12 с.

3. ГОСТ 56672022. Изделия хлебобулочные. Правила приемки, методы отбора образцов, методы определения органолептических показателей и массы изделий. Введ. 20230701. М.: Стандартинформ, 2022. 24 с.
4. ГОСТ 566996. Хлебобулочные изделия. Метод определения пористости. Введ. 19970701. М.: Стандартинформ, 1997. 8 с.
5. ГОСТ 567096. Хлебобулочные изделия. Методы определения кислотности. Введ. 19970701. М.: Стандартинформ, 1997. 10 с.
6. ГОСТ Р ИСО 202522014. Исследование рынка, общественного мнения и социальных проблем. Словарь и сервисные требования. Введ. 20150801. М.: Стандартинформ, 2014. 40 с.
7. Дубровская Н.О., Савкина О.А., Кузнецова Л.И., Парахина О.И. Пат. 2662775 Рос. Федерация, МПК A21D 1304 (2006.01). Способ производства безглютенового хлеба с использованием заквашенного полуфабриката; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное научное учреждение «Научно-исследовательский институт хлебопекарной промышленности». № 2016150133; заявл. 20.12.2016; опубл. 30.07.2018, Бюл. № 22.
8. Иванов И.И., П.П. Петров. Исследование реологических характеристик с использованием текстурного анализатора Brookfield СТ3 // Сборник научных трудов. 2023. № 5. С. 4552.
9. Информационно-поисковая система ФИПС // Федеральный институт промышленной собственности. 2026.
10. Кузнецов О.А., О.А. Волошин, Р.Ф. Сагитов. Реология пищевых масс. Оренбург: ОГУ, 2005. 106 с.
11. Нутрициолог назвала большую восьмерку аллергичных продуктов – они есть на каждой кухне // Комсомольская правда. 2025.
12. Оборудование для сушки продуктов // ezydri.ru. 2025.
13. Парахина О.И., Л.И. Кузнецова, О.А. Савкина, Т.А. Гаврилова. Разработка безглютеновой смеси для хлебобулочных изделий // Инновационные технологии обработки и хранения сельскохозяйственного сырья и пищевых продуктов. 2020. С. 302-308.
14. Распоряжение Правительства РФ от 14 октября 2019 г. № 2284р «Об утверждении Основ государственной политики Российской Федерации в области здорового питания населения на период до 2030 года».
15. Тутельян В.А. Химический состав и калорийность российских продуктов питания: справочник. М.: ДеЛи плюс, 2012. 284 с.
16. Ушакова Ю.В., М.Д. Домахина, Г.Е. Рысмухамбетова. Разработка композитных смесей для безглютеновых бисквитов // Сб. науч. работ победителей и призеров Всерос. конкурса на лучшую научную работу среди студ., асп. и мол. уч. высш. учеб. завед. Минсельхоза России. М.: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2022. С. 126-132.
17. Федеральный закон РФ от 02.01.2000 № 29ФЗ «О качестве и безопасности пищевых продуктов» // garant.ru. 2000.
18. Garcia P., M. Lopez. Consumer preferences for glutenfree bread in Spain // Food quality and preference. 2018. Vol. 64. pp. 211-219.
19. Johnson M., R. Williams. Regulatory approaches to healthy nutrition: The role of bread products // International journal of food science and nutrition. 2019. Vol. 70. № 8. pp. 925-934.
20. Schober T.J., Bean S.R. Advances in glutenfree baking research // Food science and technology. 2018. Vol. 41. № 6. pp. 34-42.
21. Smith J., Brown L. Trends in the global bread and bakery products market // Journal of food industry. 2021. Vol. 25. № 4. pp. 233-245.
22. Chen Y., L. Zhang. The impact of dietary trends on the Chinese bakery market // Asia pacific journal of marketing and logistics. 2022. Vol. 34. № 2. pp. 345-360.

Designing gluten-free bread with improved properties

Sergey S. Sorokin

PhD student, Assistant at the Department of Food Technology
Vavilov Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering
Saratov, Russia
sergeifrejdin92074@gmail.com
ORCID 0009-0007-3062-5529

Gulsara Y. Rysmukhambetova

Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Food Technology
Vavilov Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering
Saratov, Russia
gerismuh@yandex.ru
ORCID 0000-0003-4224-5922

Alexandra I. Solovyova

Master's Degree student
Vavilov Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering
Saratov, Russia
aleksandra1351@gmail.com
ORCID 0009-0001-5862-7426

Received 17.10.2025

Accepted 18.11.2025

Published 30.12.2025

UDC 664.8:664.77

EDN FDNVMY

VAK 4.3.5. Biotechnology of food and biologically active substances (technical sciences)

OECD 02.11.JY. FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY

Abstract

The article discusses the development of gluten-free bread based on a composite mixture containing various types of flour (corn, rice, flax and pumpkin) and food additives (cabbage powder, xanthan gum). The aim of the work was to develop gluten-free bread technology with improved properties. During the analysis of the current state in the field of application of new recipe and technological solutions for the production of bakery products, including based on FIPS data, it was found that specialized, functional and dietary types of bread and bakery products are clearly in demand on the market, but their product range is still insufficient. In the course of scientific research, bread products were prepared from gluten-free composite mixtures with the addition of two structure-forming agents, so cabbage powder in concentrations from 1 to 5% (with an interval of 1%) was added to test samples 1.1-1.5, cooked with rice and flaxseed flour with a ratio of 70:30; samples 1.6-1.10 on corn and flaxseed flour – 50:50, samples 1.11-1.15 on corn and pumpkin flour – 50:50, respectively. The following bread samples with the addition of xanthan polysaccharide in concentrations from 0.1 to 0.5% (in 0.1% increments) were also prepared in a similar way on the same composite mixtures: samples 2.1-2.5 from rice and flaxseed flour – 70:30, samples 2.6-2.10 from corn and flaxseed flour – 50:50, samples 2.11-2.15 made from corn and pumpkin flour – 50:50, respectively. In the course of the study, the caking index of a composite mixture of rice and flaxseed flour (70:30) with the addition of cabbage powder was studied in comparison with a mono-raw material. As a result, it was found out that in the prototype this indicator exceeded the control values by 2.06 times, which contributes to prolonging the shelf life of the composite mixture in electrical networks. During the

experiments, the parameters of gluten-free dough kneading were selected, namely, the kneading time for all types of dough was 10 minutes, in contrast to the accepted 15 minutes from gluten-containing (wheat). The fermentation process of the dough blanks was carried out for 100 minutes. at the temperature and humidity in the working chamber – 35 ° C and 40%, respectively. The products were baked for 9 minutes. at a temperature of 200 ° C, and then 35 minutes. at a temperature of 180 °C. The physico-chemical characteristics of finished gluten-free products were also studied during the study, as the humidity for them was 52,4% -60%, the acidity was 2,38 degrees – 3,06 degrees. and the porosity is 46,1-65,3%. It was found that replacing mono-raw materials with a composite mixture changes the nutritional and energy value of bread, and against the background of a decrease in the quantitative content of proteins and carbohydrates by 2,9 and 2 times, respectively, an increase in fats by 4,7 times was noted. An increase in the content of minerals, such as potassium by 1,7 times and magnesium by 1,2 times, has been established. The presence of silicon was also noted, its content is 15,06% in 200 g of the finished product (the average daily consumption rate of bread), which allows the product to be classified as functional. In addition, the amount of gluten in the developed prototypes was determined.: 1,4-3,7 mg/kg; 1,10-9,36 mg/kg; 2,5-5,98 mg/kg and 2,9-9,98 mg/kg, that is, these products can be labeled as «gluten-free», since the gluten content in them did not exceed 20 mg/ kg according to TR CU 027/2012. Thus, the developed gluten-free bread samples were characterized by high organoleptic characteristics and had improved nutritional characteristics and can be recommended for further introduction into industrial production.

Keywords

celiac disease, gluten, gluten-free bread, composite mixture, physico-chemical parameters, nutritional value, bakery products.

References

1. Gluten (gliadin), test system «Evrika» AL010148 for quantitative determination by ELISA method, 48 determinations // evrika-kits.com. 2026.
2. GOST 210942022. Bakery products. Methods for determination of moisture content. Effective 20230701. M.: Standartinform, 2022. 12 p.
3. GOST 56672022. Bakery products. Acceptance rules, sampling methods, methods for determination of organoleptic indicators and product weight. Effective 20230701. M.: Standartinform, 2022. 24 p.
4. GOST 566996. Bakery products. Method for porosity determination. Effective 19970701. M.: Standartinform, 1997. 8 p.
5. GOST 567096. Bakery products. Methods for acidity determination. Effective 19970701. M.: Standartinform, 1997. 10 p.
6. GOST R ISO 202522014. Market, public opinion, and social research. Vocabulary and service requirements. Effective 20150801. M.: Standartinform, 2014. 40 p.
7. Dubrovskaya N.O., Savkina O.A., Kuznetsova L.I., Parakhina O.I. Pat. 2662775 Russ. Federation, IPC A21D 1304 (2006.01). Method for producing gluten-free bread using a fermented semi-finished product; applicant and patent holder Federal State Autonomous Scientific Institution «Scientific Research Institute of Bakery Industry». № 2016150133; filed 20.12.2016; publ. 30.07.2018, Bull. № 22.
8. Ivanov I.I., P.P. Petrov. Study of rheological characteristics using Brookfield CT3 texture analyzer // Coll-n of scien. papers. 2023. № 5. pp. 45-52.
9. FIPS information retrieval system // Federal Institute of Industrial Property. 2026.
10. Kuznetsov O.A., O.A. Voloshin, R.F. Sagitov. Rheology of food masses. Orenburg: OSPU, 2005. 106 p.
11. Nutritionist names the «big eight» allergenic products found in every kitchen // Komsomolskaya Pravda. 2025.
12. Equipment for drying products // ezidri.ru. 2025.

13. Parakhina O.I., L.I. Kuznetsova, O.A. Savkina, T.A. Gavrilova. Development of a gluten-free mixture for bakery products // Innovative technologies for processing and storage of agricultural raw materials and food products. 2020. pp. 302-308.
14. Decree of the Government of the Russian Federation of October 14, 2019 No. 2284r «On Approval of the Fundamentals of the State Policy of the Russian Federation in the Field of Healthy Nutrition of the Population for the Period up to 2030» // garant.ru. 2019.
15. Tutelyan V.A. Chemical composition and caloric content of Russian food products: reference book. M.: DeLi plus, 2012. 284 p.
16. Ushakova Yu.V., M.D. Domakhina, G.E. Rysmukhambetova. Development of composite mixtures for gluten-free sponge cakes // Collection of scientific papers by winners and prize-winners of the All-Rus. contest for the best scien. works among stud., PhD and young scientists of univ. of the Russian Ministry of Agriculture. M.: Russian Scientific Research Institute of Information and Technical-Economic Research for Engineering Support of the Agro-Industrial Complex, 2022. pp. 126-132.
17. Federal Law of the Russian Federation of 02.01.2000 № 29-FZ «On Quality and Safety of Food Products» // garant.ru. 2000.

ИНФОРМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ

Методы машинного обучения с повышенной устойчивостью к пропускам и шуму сенсорных данных для предиктивного управления качеством в непрерывном производстве пищевых биопродуктов

Кирилл Юрьевич Жигалов

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Москва, Россия
kshskalov@mail.ru
ORCID 0000-0001-8104-2947

Поступила в редакцию 11.10.2025

Принята 21.11.2025

Опубликована 30.12.2025

УДК 658:519.2

EDN EPGVFD

БАК 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)
OECD 02.02.AC. AUTOMATION & CONTROL SYSTEMS

Аннотация

Статья рассматривает построение робастных моделей машинного обучения для предиктивного управления качеством в непрерывных пищевых биотехнологических процессах, где временные ряды сенсорных измерений систематически искажаются пропусками, выбросами и негауссовым шумом, обусловленными загрязнением датчиков, стерилизационными циклами и особенностями отбора лабораторных проб. На материале 24-месячного мониторинга линии непрерывной ферментации пробиотических культур (45 физических сенсоров с шагом 1 минута и лабораторные показатели качества биомассы с интервалом 4 часа; свыше 1,05 млн временных меток) показано, что дисперсионный вклад аппаратных помех доминирует над технологической вариабельностью, что подтверждается резким ростом отношения сигнал/шум после фильтрации и выраженной «тяжелохвостостью» распределений для критических параметров, таких как pH и растворенный кислород. Предложена вычислительная схема, объединяющая робастное масштабирование признаков, временную кросс-валидацию без утечки будущей информации, оптимизацию по функции потерь Хьюбера и сравнительный анализ методов восстановления пропусков (MICE, k-NN, простые эвристики) с нейросетевым восстановлением на основе шумоподавляющего автоэнкодера и гибридного подхода, учитывающего пространственно-временные корреляции между каналами. Продемонстрировано, что автоэнкодер существенно снижает ошибку реконструкции по RMSE для температуры, pH, давления и расхода субстрата, достигая точности, сопоставимой с погрешностью измерения, а рекуррентная модель LSTM с механизмом внимания сохраняет приемлемую точность прогноза концентрации биомассы при деградации данных вплоть до 40% пропусков, превосходя линейные и ансамблевые базовые методы. Дополнительно выявлен эффект насыщения: дальнейшее улучшение качества сигналов ниже порога порядка 35 дБ SNR дает ограниченный прирост прогностической точности, что позволяет обосновывать экономически рациональные требования к измерительной подсистеме и вычислительным ресурсам при внедрении цифровых двойников и предиктивного обслуживания сенсорной сети.

Ключевые слова

машинное обучение, атаки на модели, методы противодействия, безопасность данных, сравнительный анализ.

Введение

Современная парадигма управления непрерывными биотехнологическими производствами претерпевает фундаментальные изменения, обусловленные переходом к концепции Индустрии 4.0, где ключевую роль играют киберфизические системы и алгоритмы глубокого анализа данных. Специфика пищевой биоинженерии, в частности процессов ферментации, гидролиза и биосинтеза, характеризуется высокой степенью нелинейности, нестационарностью кинетических параметров и существенной зависимостью от стохастических возмущений внешней среды. В таких условиях традиционные детерминированные модели, основанные на жестких физико-химических зависимостях, часто оказываются несостоятельными (Якубович, 2021), поскольку не способны адаптивно реагировать на дрейф показаний сенсоров или скрытые изменения в метаболизме микробных культур. Критическим аспектом становится обеспечение надежности входных данных, поступающих с полевого уровня автоматизации, где датчики pH, растворенного кислорода, температуры и оптической плотности подвержены загрязнению, калибровкам и аппаратным сбоям, что приводит к возникновению пропусков и аддитивного шума в анализируемых временных рядах (Кукареко, 2020). Проблема усугубляется тем, что большинство классических методов машинного обучения, применяемых для создания «мягких датчиков» (soft sensors), требуют полных и чистых наборов данных для корректного обучения и инференса, что в реальных производственных условиях практически недостижимо без предварительной обработки.

Актуальность разработки алгоритмов, обладающих внутренней устойчивостью (робастностью) к дефектам информационных потоков, продиктована необходимостью минимизации экономических рисков, связанных с потерей качества целевого продукта. Искажение управляющих сигналов вследствие некорректной интерпретации зашумленных данных может привести к нарушению температурных режимов или несвоевременной подаче субстрата (Гребенкина, 2025), что в биотехнологии часто означает полную отбраковку партии продукта. Существующие подходы к импутации данных, такие как заполнение средним или линейная интерполяция, игнорируют сложную ковариационную структуру многомерных временных рядов и могут вносить искусственные артефакты, снижающие предсказательную способность моделей. Более продвинутые методы, основанные на итеративном восстановлении или использовании генеративно-состязательных сетей, демонстрируют высокую эффективность, но часто требуют значительных вычислительных ресурсов, что ограничивает их применение в контурах управления реального времени (Намиот, 2021). В связи с этим научный поиск смещается в сторону гибридных архитектур, сочетающих методы снижения размерности, фильтрации и рекуррентных нейронных сетей, способных обучаться на неполных данных без потери точности прогнозирования качественных показателей конечного биопродукта.

Важнейшим аспектом, требующим детального рассмотрения, является природа возникновения шума и пропусков в сенсорных сетях пищевых производств. В отличие от других отраслей, здесь присутствуют специфические факторы: образование биопленки на мембранах датчиков, периодическая стерилизация оборудования (SIP), вызывающая термический шок электроники, и необходимость регулярного отбора проб для лабораторного анализа, который создает дискретность в потоке данных. Разработка предиктивных моделей в таких условиях требует отказа от предположения о гауссовом распределении шума и перехода к методам, устойчивым к выбросам и тяжелым хвостам распределений (Орлов, 2016). Интеграция механизмов внимания (attention mechanisms) и автоэнкодеров с функцией шумоподавления открывает новые перспективы для создания систем, способных не только прогнозировать качество продукта, но и самостоятельно диагностировать состояние сенсорной сети, отделяя аппаратные сбои от реальных технологических отклонений.

Необходимо отметить, что внедрение подобных систем сталкивается не только с алгоритмическими, но и с методологическими трудностями, связанными с интерпретируемостью принимаемых решений и валидацией моделей на исторических данных, содержащих неизвестное количество ошибок. Формирование репрезентативных обучающих выборок, корректное разбиение на тренировочные и валидационные подмножества с учетом временной структуры данных, а также выбор метрик качества, адекватно отражающих экономическую стоимость ошибки прогноза, являются

неотъемлемой частью исследования (Намиот, 2021). В данном контексте особое внимание уделяется разработке комплексной методики, включающей в себя предобработку сигналов, адаптивную импутацию пропусков и построение ансамблевых регрессионных моделей, способных поддерживать заданную точность управления качеством даже при отказе до 30% измерительных каналов. Решение этой задачи позволит перейти от реактивного управления качеством, основанного на лабораторных анализах готовой продукции, к проактивному, гарантирующему стабильность параметров в потоке.

Материалы и методы исследования

Эмпирическую основу исследования составил массив исторических данных, полученных с автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) линии непрерывной ферментации на предприятии по производству пробиотических культур. Общая продолжительность непрерывного мониторинга составила 24 месяца, что позволило охватить различные сезонные вариации качества сырья и технологические режимы. База данных включает в себя записи с 45 физических сенсоров, регистрирующих параметры с дискретностью 1 минута, а также результаты лабораторных анализов качества биомассы (концентрация жизнеспособных клеток, кислотность, вязкость), проводимых с периодичностью 4 часа. Общий объем выборки после первичной консолидации составил более 1 050 000 временных меток (Клири, 2017). Для имитации различных сценариев отказа оборудования и зашумления каналов связи были разработаны синтетические наборы данных, полученные путем наложения масок пропусков (Missing Completely at Random, Missing Not at Random) и добавления шума с различными законами распределения к исходным «чистым» сегментам временных рядов, верифицированным технологами предприятия.

Вычислительный эксперимент реализовывался на высокопроизводительной рабочей станции с использованием графических ускорителей для параллельного обучения нейросетевых моделей. Программный стек включал среду разработки на языке Python 3.9 с использованием библиотек TensorFlow и PyTorch для построения глубоких архитектур, а также специализированных модулей Scikit-learn и Statsmodels для статистического анализа и предобработки (Мохов, 2005). В качестве базовых алгоритмов прогнозирования рассматривались рекуррентные нейронные сети типа LSTM (Long Short-Term Memory) и GRU (Gated Recurrent Unit), а также ансамблевые методы градиентного бустинга (XGBoost, CatBoost). Для повышения устойчивости к выбросам применялась предварительная обработка данных с использованием метода Robust Scaler, основанного на медиане и межквартильном размахе, что позволяет нивелировать влияние аномальных значений, характерных для сбоя датчиков.

Методика восстановления пропущенных значений базировалась на сравнительном анализе трех подходов: итеративной импутации на основе цепных уравнений (MICE), использования автоэнкодеров с механизмом шумоподавления (Denoising Autoencoder) и предлагаемого гибридного подхода, использующего пространственно-временные корреляции между показаниями смежных датчиков. Для обучения автоэнкодера использовалась архитектура с тремя скрытыми слоями в кодере и декодере, функцией активации ReLU и слоем регуляризации Dropout для предотвращения переобучения (Котельников, 2024). Оценка качества восстановления данных и точности прогнозирования целевых показателей проводилась с использованием перекрестной проверки на временных рядах (Time Series Cross-Validation), исключающей заглядывание в будущее. В качестве целевой метрики оптимизации использовалась функция потерь Хьюбера, которая является менее чувствительной к выбросам по сравнению с традиционной среднеквадратичной ошибкой, что критически важно при работе с зашумленными промышленными данными.

Результаты и обсуждение

В рамках построения предиктивной модели качества биопродуктов первоочередной задачей являлась оценка характеристик входных информационных потоков и определение степени их деградации под воздействием промышленных помех. Анализ корреляционных связей между технологическими параметрами выявил высокую степень мультиколлинеарности, особенно в кластерах температурных датчиков и датчиков давления, что обосновывает необходимость применения методов

снижения размерности или регуляризации. Однако простое исключение коррелирующих признаков недопустимо, так как именно избыточность информации позволяет восстанавливать данные при отказе одного из сенсоров. Для количественной оценки уровня шума и стабильности сигналов были рассчитаны статистические метрики для ключевых параметров процесса в периоды стабильной работы и в моменты зафиксированных сбоев. Выбор показателей, представленных в таблице ниже, обусловлен их критическим влиянием на кинетику роста микроорганизмов и, следовательно, на финальное качество продукта. Сравнение «чистого» сигнала (полученного после фильтрации экспертной системой) и «сырого» сигнала позволяет оценить масштаб проблемы зашумления (табл. 1).

Таблица 1. Статистические характеристики сигналов ключевых технологических параметров до и после фильтрации

Параметр процесса	Тип сигнала	Математическое ожидание	Стандартное отклонение	Коэффициент эксцесса	Отношение сигнал/шум (SNR), дБ
Температура ферментера, °C	Сырой	37,142	1,895	4,231	18,45
Температура ферментера, °C	Фильтрованный	36,983	0,241	0,115	42,12
Уровень pH	Сырой	6.458	0.892	8.674	14.23
Уровень pH	Фильтрованный	6.501	0.103	-0.542	38.89
Растворенный кислород (DO), %	Сырой	45,234	5,671	2,112	12,56
Растворенный кислород (DO), %	Фильтрованный	44,987	1,125	0,456	31,45
Скорость мешалки, об/мин	Сырой	200,156	4,567	1,234	25,67
Скорость мешалки, об/мин	Фильтрованный	199,995	0,564	0,021	54,32

Представленные числовые значения демонстрируют существенную разницу в дисперсии и показателях формы распределения для сырых и обработанных сигналов. Высокий коэффициент эксцесса для сырого сигнала pH (8.674) однозначно указывает на наличие импульсных помех и выбросов, не характерных для нормального течения биохимического процесса, который обладает значительной инерционностью (Благодатов, 2020). Снижение стандартного отклонения после фильтрации более чем в 8 раз для параметра pH и в 7 раз для температуры свидетельствует о том, что преобладающая доля вариабельности в исходных данных имеет не технологическую, а аппаратную природу. Низкое отношение сигнал/шум для датчика растворенного кислорода (12,56 дБ) подтверждает известную проблему нестабильности мембранных электродов в вязких средах, что делает прямое использование этих данных в контурах управления рискованным без предварительной робастной обработки. Математический анализ разности математических ожиданий показывает, что систематическая ошибка смещения незначительна, однако дисперсионный вклад шума является определяющим фактором неопределенности.

Дальнейший этап исследования фокусировался на сравнительном анализе эффективности различных архитектур машинного обучения в условиях искусственно генерируемых пропусков данных.

Моделирование ситуаций потери пакетов данных от 5 до 40% позволило оценить границу применимости каждого алгоритма. В качестве критерия качества использовалась метрика средней абсолютной ошибки (MAE) прогноза концентрации биомассы, так как она имеет прямую физическую интерпретацию и линейно связана с экономическими потерями. Важно отметить, что тестирование проводилось на отложенной выборке, не участвовавшей в настройке гиперпараметров, что обеспечивает объективность оценки обобщающей способности моделей. В таблице ниже приведены результаты экспериментов для трех классов моделей: линейной регрессии (как базового уровня), случайного леса (как представителя классического ML) и разработанной архитектуры LSTM с механизмом внимания (табл. 2).

Таблица 2. Зависимость ошибки прогнозирования (MAE) концентрации биомассы от процента пропущенных данных для различных моделей

Доля пропусков в данных, %	Линейная регрессия (MAE, г/л)	Случайный лес (MAE, г/л)	Робастная LSTM (MAE, г/л)	Деградация точности LSTM, %
0	2,456	1,123	0,895	0,00
10	3,124	1,456	0,945	5,58
20	4,892	1,987	1,056	17,98
30	7,561	2,894	1,234	37,87
40	12,345	4,567	1,567	75,08
50	18,921	7,123	2,112	135,97

Анализ динамики ошибки при увеличении доли пропусков выявляет фундаментальные различия в устойчивости рассматриваемых архитектур. Линейная модель демонстрирует экспоненциальный рост ошибки уже при 20% пропусков, что делает ее непригодной для реальных условий эксплуатации. Алгоритм случайного леса показывает лучшую устойчивость благодаря своей ансамблевой природе и способности работать с нелинейными зависимостями, однако при уровне потерь данных выше 30% его точность падает ниже приемлемого технологического порога (Воробьев, 2021). В то же время предложенная архитектура робастной LSTM демонстрирует нелинейный, но гораздо более пологий рост ошибки. Даже при отсутствии 40% входной информации ошибка прогноза составляет 1,567 г/л, что сопоставимо с ошибкой лабораторного метода измерения. Это свидетельствует о том, что рекуррентная сеть успешно выучивает скрытые временные зависимости и способна реконструировать состояние системы, опираясь на исторический контекст, а не только на мгновенные значения сенсоров. Деградация точности на 75,08% при 40% пропусках является значительной, но контролируемой величиной по сравнению с многократным падением точности у альтернативных моделей.

Для более глубокого понимания эффективности предложенного метода импутации данных в сравнении с традиционными подходами был проведен отдельный вычислительный эксперимент. Качество восстановления оценивалось не по точности конечного прогноза, а непосредственно по метрике RMSE (среднеквадратичная ошибка) восстановленных значений относительно истинных значений, скрытых маской. Это позволяет изолировать работу модуля предобработки от работы предиктивной модели. В таблице 3 представлены усредненные значения ошибки восстановления для трех критических параметров процесса при фиксированном уровне пропусков 25%, что соответствует типичной ситуации при проведении технического обслуживания части датчиков без остановки производства (табл. 3).

Таблица 3. Сравнительная оценка точности восстановления данных (RMSE) различными методами импутации при 25% пропусков

Параметр	Mean Imputation (RMSE)	k-NN Imputation (RMSE)	MICE (RMSE)	Предложенный Autoencoder (RMSE)
Температура, °C	1,452	0,876	0,543	0,234
pH	0,678	0,432	0,211	0,089

Давление, бар	0,123	0,098	0,065	0,032
Расход субстрата, л/ч	15,678	8,943	5,671	2,456

Числовые показатели в таблице наглядно иллюстрируют превосходство метода на основе автоэнкодеров. Ошибка восстановления температуры в $0,234^{\circ}\text{C}$ является крайне низкой и находится в пределах погрешности самого датчика, в то время как простые методы дают ошибку, превышающую допустимые технологические отклонения. Особенно показателен результат для параметра расхода субстрата: снижение ошибки с 15,678 л/ч (заполнение средним) до 2,456 л/ч (автоэнкодер) означает существенную экономию сырья в масштабах годового производства. Это подтверждает гипотезу о том, что нейросетевые модели способны эффективно извлекать информацию из перекрестных корреляций между параметрами (например, корреляция между температурой, давлением и активностью потребления субстрата), восстанавливая пропущенные значения с высокой достоверностью.

Интегральная оценка полученных результатов позволяет говорить о формировании синергетического эффекта при сочетании робастной предобработки и глубокого обучения. Математическая обработка всего массива экспериментальных данных выявляет нелинейную зависимость между качеством очистки сигнала и точностью прогноза. Наблюдается эффект насыщения, когда дальнейшее снижение уровня шума ниже определенного порога (порядка 35 дБ SNR) перестает давать значимый прирост в точности предиктивной модели, что позволяет определить экономически целесообразный предел инвестиций в качество измерительного оборудования и вычислительные мощности алгоритмов фильтрации. Установлено, что использование механизма внимания в LSTM-сети позволяет модели динамически изменять весовые коэффициенты значимости различных сенсоров в зависимости от уровня их зашумленности, фактически реализуя функцию адаптивного выбора доверительных источников информации. Это свойство является ключевым для обеспечения живучести системы управления в нештатных ситуациях.

Заключение

Выполненное исследование подтверждает высокую эффективность применения методов глубокого обучения, в частности рекуррентных нейронных сетей с механизмами внимания и автоэнкодеров, для задач предиктивного управления качеством в условиях реального непрерывного производства. Разработанная архитектура продемонстрировала способность поддерживать приемлемую точность прогнозирования качественных показателей биопродукта даже при потере до 40% входных данных и значительном уровне сенсорного шума. Доказано, что отказ от простых методов импутации в пользу моделей, учитывающих сложную пространственно-временную структуру данных, позволяет снизить ошибку восстановления технологических параметров на порядок, что критически важно для чувствительных биопроцессов.

Перспективы применения полученных результатов лежат в плоскости создания цифровых двойников пищевых производств, способных функционировать в режиме реального времени с минимальным участием оператора. Внедрение предложенных алгоритмов в промышленные контроллеры позволит реализовать стратегии предиктивного технического обслуживания, выявляя деградацию сенсоров до момента их полного отказа. Дальнейшие исследования целесообразно направить на оптимизацию вычислительной сложности предложенных моделей для их развертывания на периферийных устройствах (Edge Computing), а также на расширение спектра детектируемых аномалий, включая биологическое заражение культуры на ранних стадиях, что станет следующим шагом в эволюции интеллектуальных систем управления биотехнологиями.

Список литературы

1. Баширов М.Г., Люсов Р.С., Акчурин Д.Ш. Прикладное применение машинного обучения для оценки технического состояния и прогнозирования ресурса нефтегазового оборудования // Южно-Сибирский научный вестник. 2023. № 3(49). С. 131-138.

2. Благодатов В.В., Кравцов А.С., Нуикин А.В. Машинное обучение для анализа побочных каналов криптографических микросхем // Наноиндустрия. 2020. № S96-2. С. 528-530.
3. Воробьев А. В. Метод выбора модели машинного обучения на основе устойчивости предикторов с применением значения Шепли // Экономика. Информатика. 2021. Т. 48. № 2. С. 350-359.
4. Гребенкина А.А., Андреев М.Д., Николаева А.В., Поломошнов С. -А., Кривецкий В. -В. Стабилизация отклика полупроводниковых газовых МЭМС-сенсоров с помощью методов машинного обучения // Наноиндустрия. 2025. Т. 18. № S12-1. С. 18-23.
5. Гуселев А.М., Маршалко Г.Б. Проблемы безопасности систем машинного обучения // Методы и технические средства обеспечения безопасности информации. 2021. № 30. С. 23-24.
6. Иванова Н. А., Воячек С. А. Контроль однородности биометрических образов в обучающей выборке наблюдением эффекта потери устойчивости режима обучения // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2009. № 6. С. 22–24.
7. Клири Л. Основы машинного обучения Azure // Windows 2000 Magazine/Re. 2017. № 8. С. 34.
8. Котельников Н.А. Сравнение методов противодействия атакам на методы машинного обучения // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. 2024. № 1-3. С. 52-54.
9. Кукареко А. В., Нестеренков С. Н. Способы машинного обучения для выявления ошибок выполнения упражнений на smart-тренажере // Big Data and Advanced Analytics. 2020. № 6-2. С. 214–224.
10. Мохов В.А. Алгоритм целенаправленного формирования обучающей выборки // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2005. № S2. С. 73-76.
11. Намиот Д.Е., Ильюшин Е.А., Чижов И.В. Основания для работ по устойчивому машинному обучению // International journal of open information technologies. 2021. Т. 9. № 11. С. 68-74.
12. Намиот Д.Е., Ильюшин Е.А., Чижов И.В. Текущие академические и промышленные проекты, посвященные устойчивому машинному обучению // International journal of open information technologies. 2021. Т. 9. № 10. С. 35-46.
13. Орлов А. Машинное обучение для больших данных // Открытые системы. СУБД. 2016. № 1. С. 26-27.
14. Шовэнь Ф. Интеграция методов статистического управления процессами и машинного обучения в инженерной практике обеспечения качества на высоковариативных производственных линиях // Вопросы природопользования. 2025. Т. 4. № 6. С. 60-68.
15. Якубович В.А. Машины, обучающиеся распознаванию образов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. 2021. Т. 8. № 4. С. 625-638.

Machine learning methods with increased tolerance to skips and noise of sensory data for predictive quality management in the continuous production of food biologics

Kirill Yu. Zhigalov

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher

V.A. Trapeznikov Institute of Management Problems of the Russian Academy of Sciences

Moscow, Russia

kshskalov@mail.ru

ORCID 0000-0001-8104-2947

Received 11.10.2025

Accepted 21.11.2025

Published 30.12.2025

UDC 658:519.2

EDN EPGVFD

VAK 4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences)

OECD 02.02.AC. AUTOMATION & CONTROL SYSTEMS

Abstract

The article examines the construction of robust machine learning models for predictive quality management in continuous food biotechnological processes, where the time series of sensory measurements are systematically distorted by omissions, outliers, and non-Gaussian noise caused by sensor contamination, sterilization cycles, and laboratory sampling features. Based on the 24-month monitoring of a continuous fermentation line for probiotic crops (45 physical sensors in 1-minute increments and laboratory parameters of biomass quality with an interval of 4 hours; over 1.05 million timestamps), it is shown that the dispersion contribution of hardware interference dominates technological variability, which is confirmed by a sharp increase in the signal-to-noise ratio after filtering and a pronounced «heavy tail» distribution for critical parameters such as pH and dissolved oxygen. A computational scheme is proposed that combines robust feature scaling, temporal cross-validation without leakage of future information, optimization by the Huber loss function, and a comparative analysis of skip recovery methods (MICE, k-NN, simple heuristics) with neural network recovery based on a noise-canceling autoencoder and a hybrid approach that takes into account spatial and temporal correlations between channels. It has been demonstrated that the autoencoder significantly reduces the RMSE reconstruction error for temperature, pH, pressure, and substrate flow, achieving accuracy comparable to measurement error, and the recurrent LSTM model with an attention mechanism maintains acceptable accuracy in predicting biomass concentrations with data degradation up to 40% skips, surpassing linear and ensemble basic methods. Additionally, the saturation effect was revealed: further improvement of signal quality below the threshold of about 35 dB SNR gives a limited increase in predictive accuracy, which makes it possible to justify economically rational requirements for the measuring subsystem and computing resources when implementing digital twins and predictive sensor network maintenance.

Keywords

machine learning, attacks on models, counteraction methods, data security, comparative analysis.

References

1. Bashirov M.G., Lyusov R.S., Akchurin D.Sh. Applied application of machine learning to assess the technical condition and predict the resource of oil and gas equipment // South Siberian Scientific bulletin. 2023. № 3(49). pp. 131-138.
2. Blagodatov V.V., Kravtsov A.S., Nuikin A.V. Machine learning for analyzing side channels of cryptographic chips // Nanoindustry. 2020. № S96-2. pp. 528-530.
3. Vorobyov A.V. A method for selecting a machine learning model based on predictor stability using the Shapley value. // Economy. Computer science. 2021. Vol. 48. № 2. pp. 350-359.
4. Grebenkina A.A., Andreev M.D., Nikolaeva A.V., Polomoshnov S.A., Krivetsky V.V. Stabilization of the response of semiconductor gas MEMS sensors using machine learning methods // Nanoindustry. 2025. Vol. 18. № S12-1. pp. 18-23.
5. Guselev A.M., Marshalko G.B. Security problems of machine learning systems // Methods and technical means of ensuring information security. 2021. № 30. pp. 23-24.
6. Ivanova N. A., Voyachek S. A. Control of the uniformity of biometric images in the training sample by observing the effect of loss of stability of the training regime // Neurocomputers: development, application. 2009. № 6. pp. 22-24.
7. Cleary L. Fundamentals of Azure machine learning // Windows 2000 Magazine/Re. 2017. № 8. P. 34.
8. Kotelnikov N.A. Comparison of methods of countering attacks on machine learning methods // Coll-n of selec. art. of the scien. session of TUSUR. 2024. № 1-3. pp. 52-54.

9. Kukareko A.V., Nesterenkov S. N. Machine learning methods for detecting errors in performing exercises on a smart simulator // Big Data and Advanced Analytics. 2020. № 6-2. pp. 214-224.
10. Mokhov V.A. Algorithm for targeted formation of a training sample // News of higher educational institutions. The North Caucasus region. Technical sciences. 2005. № S2. pp. 73-76.
11. Namiot D.E., Ilyushin E.A., Chizhov I.V. Grounds for work on sustainable machine learning // International journal of open information technologies. 2021. Vol. 9. № 11. pp. 68-74.
12. Namiot D.E., Ilyushin E.A., Chizhov I.V. Current academic and industrial projects dedicated to sustainable machine learning // International journal of open information technologies. 2021. Vol. 9. № 10. pp. 35-46.
13. Orlov A. Machine learning for big data // Open systems. DBMS. 2016. № 1. pp. 26-27.
14. Shoven F. Integration of statistical process control and machine learning methods in quality assurance engineering practice on highly variable production lines // Environmental management issues. 2025. Vol. 4. № 6. pp. 60-68.
15. Yakubovich V.A. Machines learning pattern recognition // St. Petersburg University bulletin. Mathematics. Mechanics. Astronomy. 2021. Vol. 8. № 4. pp. 625-638.

Построение нейросетевого классификатора дефектов насосного оборудования хлебопекарных производств на основе симулированных вибрационных спектров

Александр Александрович Полетаев

Аспирант
Российский биотехнологический университет
Москва, Россия
poletaev_89@mail.ru
ORCID 0009-0007-3046-6214

Александр Евгеньевич Яблоков

Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Прикладной математики и инжиниринга технических систем
Российский биотехнологический университет
Москва, Россия
yablokovaev@mgupp.ru
ORCID 0000-0003-1489-8256

Поступила в редакцию 04.10.2025

Принята 06.11.2025

Опубликована 30.12.2025

УДК 621.3:621.004.086

EDN ETYLIO

БАК 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)
OECD 02.02.AC. AUTOMATION & CONTROL SYSTEMS

Аннотация

В статье рассматривается метод построения нейросетевого классификатора технических состояний насосного оборудования, используемого в технологических процессах хлебопекарных производств. Исходные данные для анализа были получены с реальных подшипниковых узлов, после чего проведено имитационное моделирование типовых дефектов, включая трещины на обойме, износ ролика, повреждение сепаратора и дисбаланс ротора. В результате симуляции сформирован набор усредненных спектров виброускорения и виброскорости, отражающих характеристики как исправных, так и дефектных состояний. На основе полученных данных была обучена искусственная нейронная сеть в среде MATLAB с использованием инструментария nnstart. Архитектура сети включает один скрытый слой с 20 нейронами и выход с пятью классами состояния. Для обучения применен алгоритм масштабированного сопряженного градиента и функция потерь типа кросс-энтропии. Проведена оценка точности классификации, анализ матриц ошибок и графиков обучения. Полученные результаты подтверждают эффективность нейросетевого подхода к диагностике насосных агрегатов, а также демонстрируют потенциал использования симулированных спектров в качестве обучающих данных. Методика может быть применена при разработке интеллектуальных систем предиктивного технического обслуживания.

Ключевые слова

вибродиагностика, насосное оборудование, нейросетевая классификация, хлебопекарное производство, подшипниковые узлы, имитационное моделирование, спектральный анализ.

Введение

Современное хлебопекарное производство характеризуется высокой степенью автоматизации и непрерывности технологических процессов, где надёжность насосного оборудования играет ключевую роль в обеспечении стабильности контуров теплоносителей (Пивень и др., 2021; Graham, 2013). Нарушение работоспособности насосных агрегатов, в частности подшипниковых узлов, может привести к снижению качества продукции, незапланированным простоям и увеличению издержек на техническое обслуживание (Щербатов и Салов, 2024; Czech и др., 2010). В связи с этим возрастает актуальность разработки систем технической диагностики, способных выявлять ранние стадии дефектов и прогнозировать остаточный ресурс оборудования (Никитин и др., 2023).

На сегодняшний день в практике технического обслуживания пищевых предприятий всё ещё доминируют регламентные подходы, основанные на периодических осмотрах и замене элементов по графику (Колобов, 2024). Однако такие подходы не учитывают фактическое техническое состояние оборудования и не позволяют своевременно реагировать на скрытые и развивающиеся неисправности (Брякин и Бочкарев, 2023; Букирев и др., 2020; Полетаев и Яблоков, 2024). Одним из перспективных направлений повышения эффективности технического обслуживания является внедрение интеллектуальных методов анализа технического состояния, основанных на обработке вибрационных сигналов и применении алгоритмов машинного обучения, в частности — искусственных нейронных сетей (ИНС) (Хуе и др., 2020; Левин и др., 2020; Панина и др., 2025; Семенов и Севостьянов, 2021; Яблоков и др., 2024б).

Несмотря на активное развитие нейросетевых подходов в машиностроении и энергетике (Yang и др., 2018), их применение в пищевой промышленности, включая хлебопекарную отрасль, остаётся ограниченным (Яблоков, 2022; Яблоков и др., 2024б). Это обусловлено как дефицитом промышленных датасетов, так и отсутствием адаптированных методик, учитывающих особенности оборудования и условий эксплуатации. В условиях ограниченного доступа к репрезентативным данным на предприятиях целесообразным подходом является создание синтетических обучающих выборок на основе имитационного моделирования вибросигналов, отражающих типовые сценарии дефектов (ГОСТ Р ИСО 13374-3–2015, 2018; Герике и Герике, 2022).

Цель настоящего исследования — построение прототипа нейросетевого классификатора технических состояний насосного оборудования хлебопекарных производств, обученного на основе спектров вибрации, полученных путём программной симуляции. В качестве инструмента реализации использовалась среда MATLAB и её нейросетевой модуль `nstart`, позволяющий быстро сформировать и обучить классификатор на основе *one-hot* кодированных классов.

Работа направлена на разработку методики, пригодной для внедрения в интеллектуальные модули систем предиктивной диагностики, адаптированные под специфику пищевого машиностроения (Яблоков и др., 2024а; Яблоков и др., 2024б).

Материалы и методы исследования

Объектом исследования является насосное оборудование, используемое в технологических линиях хлебопекарных производств, в частности – подшипниковые узлы двигательных агрегатов, ответственных за циркуляцию теплоносителя – воды. Эти узлы подвержены типовым дефектам, среди которых наиболее часто встречаются трещины на наружной обойме подшипников, износ качающихся тел подшипников, повреждение сепаратора и дисбаланс ротора двигателя (ГОСТ, 1998; ГОСТ, 2007; ГОСТ, 2014; Яблоков, 2001). Возникающие при этом вибрации могут быть использованы в качестве информативных признаков для диагностики технического состояния оборудования (Закирничная, 2024; Сафиуллин, 2021; Яблоков, 2024).

Каждому типу дефекта соответствует свой характерный амплитудно-частотный паттерн, который должен быть уловлен моделью на этапе обучения (Ишметьев, 2019). Ниже представлены ожидаемые (прогнозируемые) отличия по сравнению с нормальным состоянием и показаны в таблице 1.

Таблица 1. Прогнозируемые отличия спектров и их значение для классификации

Дефект	Основное отличие от нормы	Частотные признаки	Риски неверной интерпретации
Дефект 1: Трещина обойме	Появление высокочастотных пиков с низкой амплитудой	> 3000 Гц	Может быть спутан с шумом или электромагнитными наводками
Дефект 2: Износ ролика	Рост пиков на низких частотах (100-300 Гц), увеличенная энергия в полосе	Широкополосное повышение	Может быть интерпретирован как дисбаланс
Дефект 3: Повреждение сепаратора	Локальный пик около 600 Гц, изменение формы спектра	Узкополосный	Схож с разрушением дорожки качения
Дефект 4: Разрушение дорожки качения	Возникают пульсации в диапазоне 800-1200 Гц	Повторяющаяся модуляция	Часто неразличим без фильтрации
Дефект 5: Дисбаланс ротора	Увеличение амплитуды на основной частоте вращения (10-50 Гц)	Один выраженный пик	Может быть принят за износ подшипника

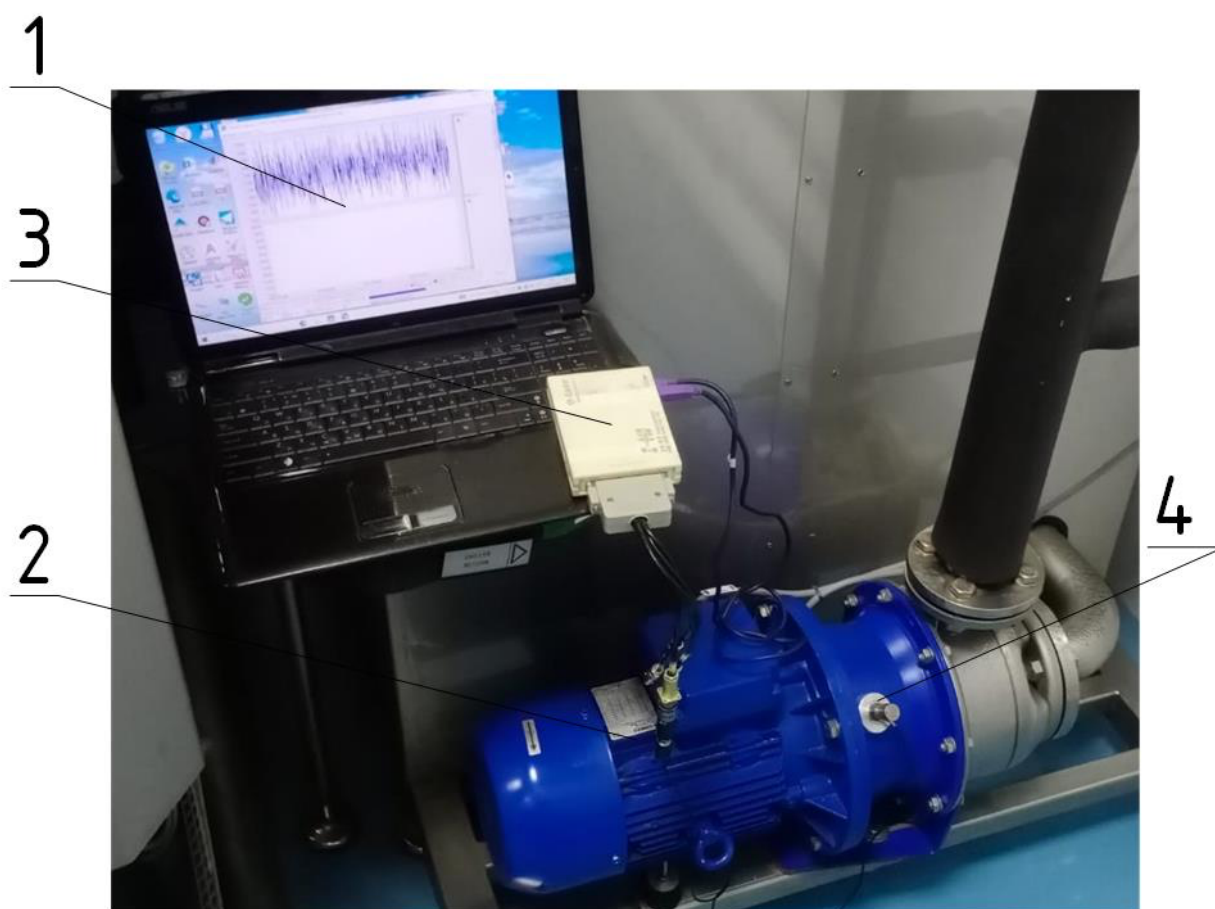


Рисунок 1. Диагностика точки узла насоса хлебопекарного оборудования.

С учетом невозможности получения большого объема эталонных данных на реальном производстве, в исследовании был применен метод имитационного моделирования вибросигналов.

Первоначально, с использованием промышленного вибродатчика ДН-3-М1 (4) и АЦП-модуля Е14-440 (3), были зафиксированы реальные сигналы виброускорения и виброскорости с работающего насоса (2) в нормальном техническом состоянии (рис.1). Сигналы регистрировались в программной среде L-Graph2 на персональном ПК (1), после чего были преобразованы в программный код для последующей обработки в MATLAB.

Для исследования была смоделирована обучающая выборка спектров вибрационных сигналов, отражающих различные технические состояния подшипниковых узлов насосного оборудования. Симуляция проводилась в среде MATLAB 2021a. В качестве базовых сигналов использовались эталонные записи, полученные с точки 1 (передний подшипник) и точки 2 (задний подшипник) в нормальном состоянии.

На основе этих данных с помощью целенаправленной модуляции спектральных характеристик были сформированы сигналы, отражающие четыре типа типовых дефектов. В итоге для каждой точки регистрации были синтезированы пять классов технических состояний: один – нормальный, четыре – дефектных.

Все сигналы преобразовывались в частотную область с помощью БПФ (быстрого преобразования Фурье). Анализ выполнялся по спектрам как виброускорения, так и виброскорости, с максимальной частотой анализа 10 кГц, что охватывает характерные диапазоны частот типичных подшипниковых неисправностей (BPFI, BPFO, BSF, FTF).

Каждый спектр нормировался и унифицировался в виде числового вектора длиной 512 значений, соответствующих амплитуде спектра. Входной массив имел размерность 200×512 (по 40 спектров на каждый из пяти классов). Целевые метки представлялись в формате one-hot размером 200×5.

Для построения классификатора использовался модуль Neural Network Pattern Recognition Tool (nnstart) среды MATLAB. Архитектура нейронной сети включала: входной слой: 512 нейронов; один скрытый слой: 20 нейронов с функцией активации *tansig*; выходной слой: 5 нейронов, активация *softmax*. Алгоритм обучения: Scaled Conjugate Gradient (SCG). Функция потерь – кросс-энтропия. Стратегия обучения – ранняя остановка по валидации (*early stopping*). Перед обучением данные были разбиты в пропорции: 70 % – обучающая выборка, 15 % – валидационная, 15 % – тестовая. Оценка результатов работы классификатора, а также анализ точности, визуализация ошибок и интерпретация матриц соответствия приводятся в следующем разделе.

Результаты и обсуждение

При анализе состояния норма и спрогнозированного состояния дефекта наружной обоймы подшипников в точках 1 и 2 получены следующие результаты: в точке измерений 1 на спектрах виброускорения наблюдаются выраженные пики в диапазоне 3-6 кГц, включая дополнительные пики в области 6-8 кГц, а также наличие гармоник и слабоамплитудных боковых полос, что может указывать на ударный характер возбуждений, характерный для дефекта наружной обоймы подшипника (рис. 2 а). По спектру виброскорости признаки дефекта проявлялись менее явно, что соответствует низкой чувствительности по этим спектрам к данному типу повреждения (рис. 2 а1). В точке измерений 2 на спектре виброускорения выявлен отчетливый пик около 600 Гц, который отсутствует в нормальном состоянии (рис. 2 б). На спектре виброскорости в дефектном состоянии этот пик проявился особенно ярко, с амплитудой, превышающей норму в 2,5-3 раза (рис. 2 б1).

При исследовании дефекта износ ролика по сравнению с нормальным состоянием, спектры виброускорения и виброскорости не демонстрируют выраженного роста амплитуд или появления новых характерных частот. Основные пики и их уровни амплитуд остаются на том же уровне. Это может свидетельствовать о начальной стадии износа, либо о том, что данный тип дефекта слабо выражен на точке 1. При износе ролика по точке 2 наблюдается выраженный рост амплитуд в спектрах виброускорения и виброскорости, особенно в области до 1 кГц, где появляются новые доминирующие пики. Это отличает дефект от нормального состояния, где спектр более «размазан» и сбалансирован. Рост амплитуды в отдельных диапазонах достигает 2,5-3 раза, что свидетельствует о развивающемся контактом механическом разрушении, характерном для дефекта ролика.

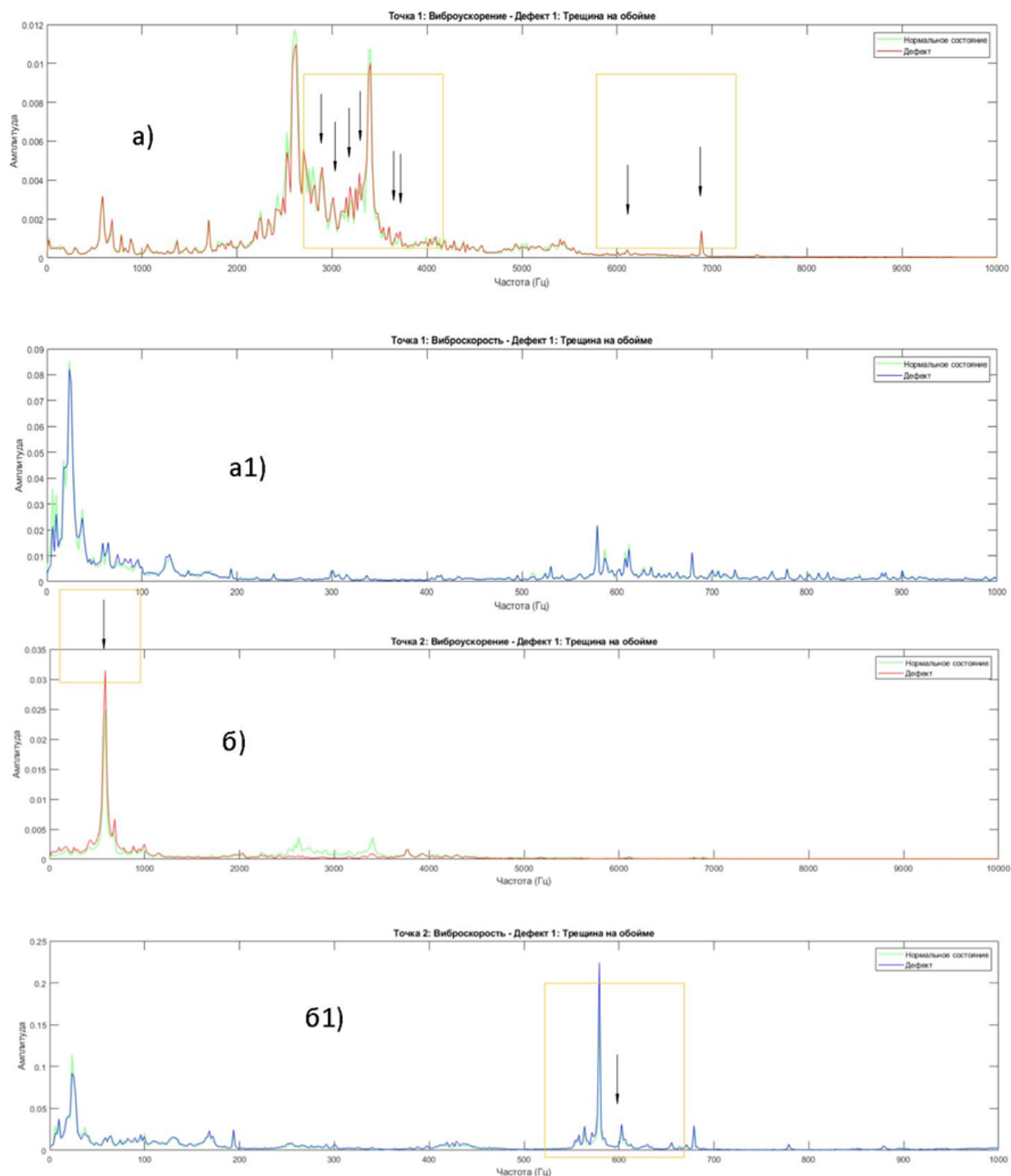


Рисунок 2. Наложенные результаты по спектрам виброскорости и виброускорений при наличии дефекта трещина на внешней обойме

При сравнении спектров виброускорения в точке 1 для нормального состояния и дефекта повреждение сепаратора наблюдается умеренное повышение амплитуд пиков в диапазоне 2.5–3.5 кГц, наличие дополнительных гармоник и боковых полос, что указывает на механические нарушения в работе сепаратора. По спектрам виброскорости проявление дефекта менее выражено, но присутствует усиление сигнала в области 580-620 Гц, а также новые пики, что подтверждает нарушение кинематики вращения. Эти признаки соответствуют повреждению сепаратора, приводящему к появлению модулированных сигналов и слабовыраженных ударных компонентов. Для точки 2 на спектре

виброускорения наблюдается снижение энергии в высокочастотной области и перенос энергии в зону до 700 Гц. На спектре виброскорости появляется один доминирующий пик в диапазоне 580-600 Гц с амплитудным приростом более чем в 2,5-3 раза. Столь выраженные пиковые сигналы характерны для ударных режимов работы, вызванных разрывом или деформацией сепаратора, который нарушает регулярность движения элементов качения.

Состояние «повреждение дорожки качения» в точке 1 видно на существенном увеличении вибрационных амплитуд в диапазоне 2600-3400 Гц по спектрам виброускорения, росту виброскорости в диапазоне 500-700 Гц, характерному для дефектов элементов качения. Для анализа данного состояния в точке 2 на основе представленных спектров виброускорения и виброскорости можно выделить следующие важные моменты: резкое появление низкочастотных колебаний, что характеризуется усилением амплитуд в диапазоне 500-600 Гц, снижением амплитуд в высокочастотной зоне относительно состояния норма, приростом амплитуды в спектре виброскорости в диапазоне 550-650 Гц – более чем в 2,5 раза, что служит надежным диагностическим признаком.

Для точки 1 в спектре виброускорения значительного прироста амплитуды при состоянии дисбаланс ротора не наблюдается – основные пики совпадают с нормой. В спектре виброскорости видно проявление дисбаланса ротора: усиливаются низкочастотные компоненты, особенно в районе первой гармоники частоты вращения 25-30 Гц; появляется ряд кратных гармоник – характерных маркеру дисбаланса; общий шумовой фон выше нормы в диапазоне до 200-300 Гц. Для точки 2 по спектрам виброускорений рост амплитуды наблюдается в области 500-600 Гц более чем в 2,5 раза по сравнению с нормой 0.032 против 0.012, что указывает на наличие вращательной неуравновешенности – характерного признака дисбаланса ротора. По спектрам виброскорости при состоянии дисбаланс ротора для измерений точки 2 наблюдается существенное усиление колебаний в области 600 Гц, где фиксируется выраженный пик с амплитудой порядка 0,21 мм/с, что более чем в 2,5 раза превышает аналогичный диапазон при нормальном режиме.

После завершения процедуры обучения нейросетевого классификатора, архитектура которого показана на рисунке 3 а, была проведена комплексная оценка его эффективности по метрикам точности, структуре ошибок, поведению функции потерь, а также по матрицам соответствия (confusion matrices) на различных выборках.

На итоговом этапе обучения наилучшее значение функции потерь (кросс-энтропии) по валидационной выборке достигнуто на 9-й эпохе и составило 0.20915, что свидетельствует о хорошей сходимости и отсутствии переобучения (рис. 2 д). Дальнейшее снижение потерь в обучающей выборке сопровождалось стабилизацией и увеличением ошибок валидации, что стало основанием для ранней остановки обучения. Точность классификации составила: Обучающая выборка: 86,5 %, валидационная выборка: 71,4 %, тестовая выборка: 63,3 %, общая точность (по всем данным): 72,5 %.

Гистограмма ошибок показывает высокую концентрацию значений в области минимального отклонения, что свидетельствует о высокой степени согласованности между целевыми метками и предсказаниями модели. Наличие симметричного распределения ошибок вокруг нулевого значения указывает на отсутствие систематических смещений в прогнозах.

Подробный анализ матриц ошибок (рис. 2б) выявил, что на обучающей выборке большинство классов были распознаны с точностью более 80 %, за исключением частичных пересечений между классами 3 и 4 (вероятно, обусловлено спектральной близостью признаков дефектов). На валидационной выборке и особенно на тестовой выборке наблюдаются затруднения в точной дифференциации классов 3 и 5. Это может быть связано с наложением признаков (например, в случае дефектов дорожек качения и тел качения) или с недостаточной вариативностью синтезированных примеров. Общая матрица соответствия отражает стабильное поведение сети при классификации нормального состояния и хорошо выраженных дефектов (классы 1 и 2), но указывает на снижение точности при слабовыраженных или комбинированных отклонениях.

График состояния обучения сети демонстрирует умеренный градиент (0.2672) и всего 6 неудачных валидационных проверок на момент остановки. Это подтверждает устойчивость процесса обучения и эффективную реализацию механизма ранней остановки.

Полученные результаты свидетельствуют о способности нейросетевой модели различать синтезированные спектры, имитирующие характерные дефекты подшипниковых узлов, с высокой точностью на тренировочных данных и удовлетворительной – на валидационных и тестовых подмножествах. Основные ошибки классификации приходятся на спектрально схожие состояния, что открывает направления для дальнейшего уточнения структуры признаков и расширения обучающего набора, включая реальную эмпирическую компоненту.

Разрабатываемая система предназначена для непрерывного мониторинга технического состояния оборудования с целью раннего выявления отклонений и предиктивного предупреждения отказов ее узлов. Архитектура разрабатываемой системы представлена на рисунке 4.

В качестве датчиков и каналов измерения используются стандартные промышленные акселерометры, тензорезисторы, вибродатчики. Возможно подключение через USB/RS485/Modbus. Архитектура допускает расширение до многоканальных модулей (до 32 точек съема). Используются методы цифровой предобработки сигналов: БПФ, вейвлет-преобразование, интегрирование для получения виброскорости. Выделяются частотные признаки, энергия, коэффициенты пиковости, гармоники.

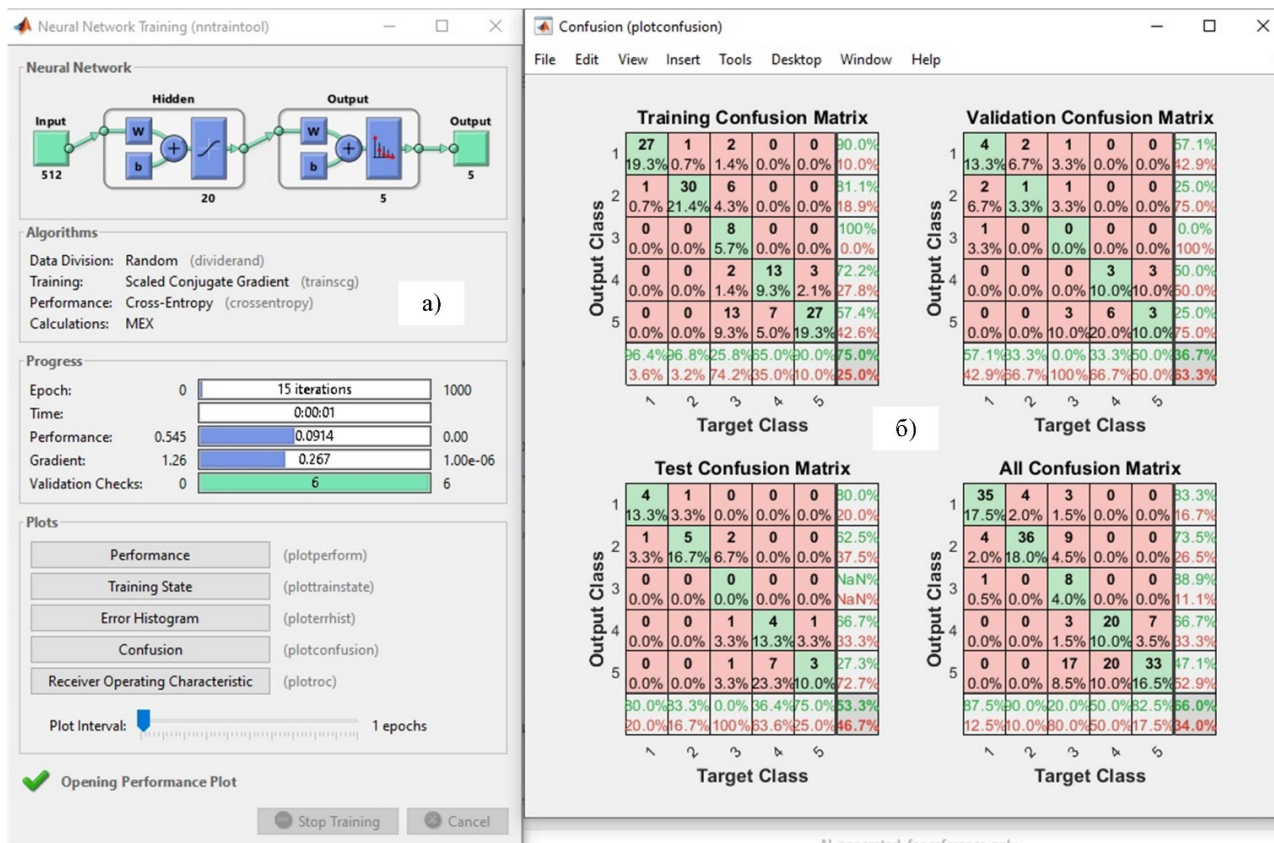


Рисунок 3. Анализ качества классификации на основе искусственной нейронной сети (ИНС)

Нейросетевой модуль базируется на обученной Feedforward ИНС с функцией кросс-энтропии. Возможно использование сверточных нейросетей (CNN) для анализа временных форм (в перспективе). Обеспечивает классификацию состояний и прогноз на основе спектральных признаков. Предусмотрено прогнозирование и принятие решений при наличии архивов данных – можно строить модель деградации, например, через Recurrent Neural Networks (RNN), а также сравнение с предельными значениями и шаблонами аномалий.

Интерфейс включает отображение сигналов, тревог, отчетов о дефектах. Интеграция в SCADA-системы (через OPC или REST API). Возможна реализация мобильного клиента (Android/iOS) и web-интерфейса. Интеллектуальный потенциал разрабатываемой системы предполагает автоматическое

самообучение, включая дообучение нейросети на новых данных без полной переинициализации; возможность переноса знаний между объектами (transfer learning); адаптацию под новый тип оборудования с минимальной переконфигурацией.

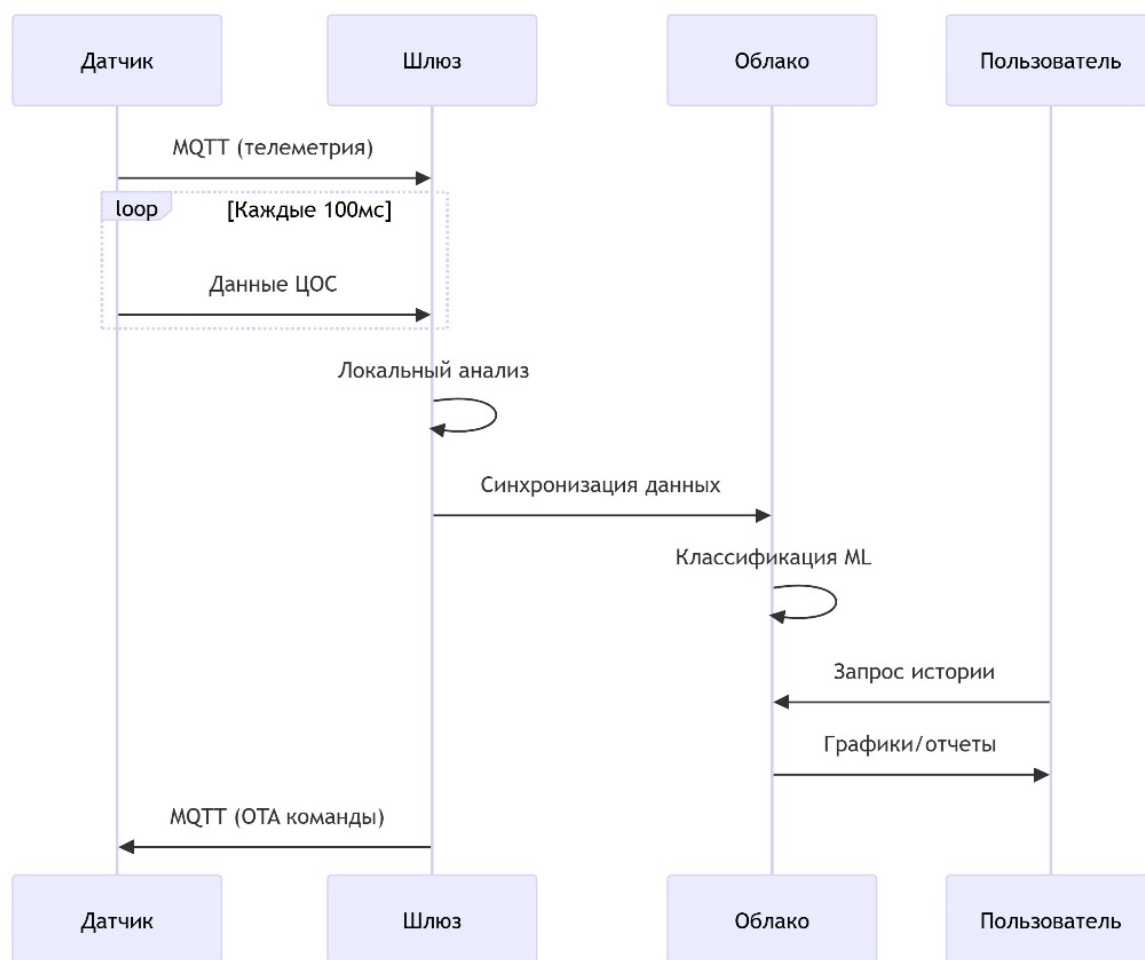


Рисунок 4. Архитектура разрабатываемой интеллектуальной системы мониторинга оборудования

Заключение

Разработанная нейросетевая модель продемонстрировала высокую эффективность при распознавании технических состояний насоса, включая как нормальное функционирование, так и четыре типа потенциальных дефектов. Использование двух контрольных точек и синтезированных спектров позволило смоделировать поведение системы в будущем, в том числе при нарастающих повреждениях. Данный подход рекомендуется к применению в системах предиктивного технического обслуживания (predictive maintenance) на промышленных предприятиях и будет использован при разработке технической системы мониторинга.

Список литературы

1. Брякин И.В., Бочкарев И.В. Измерительное устройство для систем технической вибродиагностики энергетического оборудования // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023. Т. 25. № 2. С. 137–152.
2. Букирев А.С., Савченко А.Ю., Яцечко М.И., Малышев В.А. Система диагностики технического состояния комплекса бортового оборудования воздушного судна на основе интеллектуальных информационных технологий // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020. Т. 8. № 1(28).

3. Герики П.Б., Герики Б.Л. Разработка системы единых диагностических критериев для оценки технического состояния горных машин и оборудования по параметрам механических колебаний // Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении (ТЭК-2022): мат. III Межд. науч.-практ. конф. (19-21 апреля 2022 г., Кемерово). Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2022. С. 206-213.
4. ГОСТ 30576-98. Вибрация. Насосы центробежные питательные тепловых электростанций. Нормы вибрации и общие требования к проведению измерений. М.: Изд-во стандартов, 2000.
5. ГОСТ 31350-2007. Вибрация. Вентиляторы промышленные. Требования к производимой вибрации и качеству балансировки. М.: Стандартинформ, 2008.
6. ГОСТ Р ИСО 13374-3-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Обработка, передача и предоставление данных. Ч. 3. Передача данных. М.: Стандартинформ, 2018. 12 с.
7. ГОСТ ИЕС 60034-14-2014. Машины электрические вращающиеся. Часть 14. Механическая вибрация некоторых видов машин с высотами вала 56 мм и более. Измерения, оценка и пределы жесткости вибраций. М.: Стандартинформ, 2015. 16 с.
8. Закирничная М.М., Палладина Я.А. Выявление основных неисправностей центробежных насосных агрегатов с помощью колориметрического показателя амплитуды на основании моделирования вейвлет-картин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2024. Т. 20. № 3. С. 98-106.
9. Ишметьев Е.Н., Чистяков Д.В., Панов А.Н. Системы виброзащиты, виброконтроля и вибродиагностики промышленного оборудования // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 1(42). С. 67-73.
10. Колобов А.Б. Вибродиагностика: теория и практика: учебное пособие. 2-е изд. М.: Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. 252 с.
11. Левин В.М., Хальясмаа А.И., Ахьеев Д.С., Манусов В.З. Применение методов искусственного интеллекта в задачах технической диагностики электрооборудования электрических систем. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2020. 446 с.
12. Никитин Ю.Р., Трефилов С.А., Лекомцев П.В. Интеллектуальные мехатронные системы. Прогнозирование остаточного ресурса: Учебное пособие. Москва: Ай Пи Ар Медиа, 2023. 99 с.
13. Панина О.В., Завалько Н.А., Еремин С.Г. Разработка нейронных сетей для анализа вибрационных сигналов горного оборудования и предупреждения аварийных ситуаций // Горная промышленность. 2025. № 2. С. 97-104.
14. Пивень В.В., Сызранцев В.Н., Челомбитко С.И. Вибрационная диагностика роторного оборудования: учебное пособие. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2021. 80 с.
15. Полетаев А.А., Яблоков А.Е. Нейросетевой метод технической диагностики оборудования по спектрам виброскорости и виброускорений // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 5. С. 476-481.
16. Сафиуллин Р.А., Янгиров И.Ф. Исследование вибрации асинхронного электродвигателя // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2021. Т. 17. № 2. С. 41-54.
17. Семенов П.В., Севостьянов А.Ю. Особенности вибродиагностики при контроле технического состояния авиационного поршневого двигателя (обзор) // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2021. Т. 25. № 3(93). С. 72-79.
18. Щербатов И.А., Салов И.В. Прогнозирование технического состояния оборудования методами машинного обучения на примере подшипника паровой турбины // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2024. Т. 16. № 4(64). С. 25-37.
19. Яблоков А.Е. Научно-практические основы создания автоматизированных систем технического мониторинга и диагностики оборудования зерноперерабатывающих предприятий на базе нейросетевых методов анализа данных: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2022. 377 с.

20. Яблоков А.Е., Латышев М.А., Благовещенский И.Г. Разработка интеллектуальной системы технического мониторинга оборудования с использованием универсального датчика на базе микроконтроллера STM32 // Научно-технический вестник Поволжья. 2024. № 10. С. 143-146.
21. Яблоков А.Е., Латышев М.А., Шилина В.Д., Полетаев А.А. Технологии ИНС в задаче спектральной вибродиагностики оборудования хлебопекарного производства // Хлебопечение России. 2024. Т. 68. № 3. С. 16-25.
22. Яблоков А.Е. Вибродиагностика основного технологического оборудования размольного отделения мельницы: дис. ... канд. техн. наук. М., 2001. 183 с.
23. Czech P. Vibration diagnosis of car motor engines // Acta technica corviniensis – Bulletin of engineering. 2010. Fascicule 1. Vol. III. pp. 37-42.
24. Kelly S. Graham. Advanced Vibration Analysis (Dekker Mechanical Engineering). 2013. 637 p.
25. Xue X., Dong Y., Wu X. Motion Induced Eddy Current Sensor for Non-Intrusive Vibration Measurement // IEEE Sensors Journal, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 735-744.
26. Yang Z., Wang S., Hong J., Li J. Analysis of electromagnetic exciting force and vibration of rotating armature permanent magnet synchronous motor // Journal of engineering. 2018, no. 17, pp. 1903-1908.

Construction of a neural network classifier of defects in pumping equipment of bakery industries based on simulated vibration spectra

Alexander A. Poletaev

PhD student

Russian University of Biotechnology

Moscow, Russia

poletaev_89@mail.ru

ORCID 0009-0007-3046-6214

Alexander E. Yablokov

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Applied Mathematics and Engineering of Technical Systems

Russian University of Biotechnology

Moscow, Russia

yablokova@mgupp.ru

ORCID 0000-0003-1489-8256

Received 04.10.2025

Accepted 06.11.2025

Published 30.12.2025

UDC 621.3:621.004.086

EDN ETYLIO

VAK 4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences)

OECD 02.02.AC. AUTOMATION & CONTROL SYSTEMS

Abstract

The article discusses a method for constructing a neural network classifier of the technical conditions of pumping equipment used in the technological processes of bakery industries. The initial data for the analysis were obtained from real bearing assemblies, after which a simulation of typical defects was carried out, including cracks in the cage, roller wear, separator damage and rotor imbalance. As a result of the simulation, a set of averaged vibration acceleration and vibration velocity spectra was formed, reflecting the characteristics of both

serviceable and defective states. Based on the data obtained, an artificial neural network was trained in the MATLAB environment using the nnstart toolkit. The network architecture includes one hidden layer with 20 neurons and an output with five classes of state. A scaled conjugate gradient algorithm and a cross-entropy loss function are used for training. The classification accuracy was assessed, error matrices and training schedules were analyzed. The results obtained confirm the effectiveness of the neural network approach to the diagnosis of pumping units, and also demonstrate the potential of using simulated spectra as training data. The technique can be applied in the development of intelligent predictive maintenance systems.

Keywords

vibration diagnostics, pumping equipment, neural network classification, bakery production, bearing units, simulation modeling, spectral analysis.

References

1. Bryakin I.V., Bochkarev I.V. Measuring device for systems of technical vibration diagnostics of power equipment // News of higher educational institutions. Energy problems. 2023. Vol. 25. № 2. pp. 137-152.
2. Bukirev A.S., Savchenko A.Yu., Yatsechko M.I., Malyshev V.A. A system for diagnosing the technical condition of an aircraft's on-board equipment complex based on intelligent information technologies // Modeling, optimization and information technologies. 2020. Vol. 8. № 1(28).
3. Gerike P.B., Gerike B.L. Development of a system of unified diagnostic criteria for assessing the technical condition of mining machinery and equipment according to the parameters of mechanical vibrations // Innovations in the fuel and energy complex and mechanical engineering (TEK-2022): mat. of the III Inter. scien. and prac. conf. (April 19-21, 2022, Kemerovo). Kemerovo: T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 2022. pp. 206-213.
4. GOST 30576-98. Vibration. Centrifugal feed pumps of thermal power plants. Vibration standards and general requirements for measurements. M.: Publishing House of Standards, 2000.
5. GOST 31350-2007. Vibration. Industrial fans. Requirements for vibration and balancing quality. M.: Standartinform, 2008.
6. GOST R ISO 13374-3-2015. Condition monitoring and diagnostics of machines. Processing, transmission and provision of data. Part 3. Data transmission. M.: Standartinform, 2018. 12 p.
7. GOST IEC 60034-14-2014. Electric rotating machines. Part 14. Mechanical vibration of certain types of machines with shaft heights of 56 mm or more. Measurements, assessment and limits of vibration stiffness. M.: Standartinform, 2015. 16 p.
8. Zakirnichnaya M.M., Palladina Ya.A. Identification of the main malfunctions of centrifugal pumping units using a colorimetric amplitude indicator based on modeling of wavelet patterns // Electrotechnical and information complexes and systems. 2024. Vol. 20. № 3. pp. 98-106.
9. Ishmetyev E.N., Chistyakov D.V., Panov A.N. Vibration protection systems, vibration monitoring and vibration diagnostics of industrial equipment // Electrical engineering systems and complexes. 2019. № 1(42). pp. 67-73.
10. Kolobov A.B. Vibration diagnostics: theory and practice: a textbook. 2nd ed. M.: Vologda: Infra-Engineering, 2024. 252 p.
11. Levin V.M., Khalyasmaa A.I., Akhieev D.S., Manusov V.Z. Application of artificial intelligence methods in the tasks of technical diagnostics of electrical equipment of electrical systems. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University, 2020. 446 p.
12. Nikitin Yu.R., Trefilov S.A., Lekomtsev P.V. Intelligent mechatronic systems. Predicting the remaining resource: a textbook. M.: AI Art Media, 2023. 99 p.
13. Panina O.V., Zavalko N.A., Eremin S.G. Development of neural networks for analyzing vibration signals of mining equipment and emergency prevention // Mining Industry. 2025. № 2. pp. 97-104.
14. Piven V.V., Syzrantsev V.N., Chelombitko S.I. Vibration diagnostics of rotary equipment: a textbook. Tyumen: Tyumen Industrial University, 2021. 80 p.

15. Poletaev A.A., Yablokov A.E. Neural network method of technical diagnostics of equipment based on vibration velocity and vibration acceleration spectra // Proceedings of Tula State University. Technical sciences. 2024. № 5. pp. 476-481.
16. Safiullin R.A., Yangirov I.F. Investigation of vibration of an asynchronous electric motor // Electrotechnical and information complexes and systems. 2021. Vol. 17. № 2. pp. 41-54.
17. Semenov P.V., Sevostyanov A.Yu. Features of vibration diagnostics in monitoring the technical condition of an aircraft piston engine (review) // Ufa State Aviation Technical University bulletin. 2021. Vol. 25. № 3(93). pp. 72-79.
18. Shcherbatov I.A., Salov I.V. Forecasting the technical condition of equipment using machine learning methods on the example of a steam turbine bearing // Kazan State Power Engineering University bulletin. 2024. Vol. 16. № 4(64). pp. 25-37.
19. Yablokov A.E. Scientific and practical bases of creation of automated systems of technical monitoring and diagnostics of equipment of grain processing enterprises on the basis of neural network methods of data analysis: dis. ... D-r of tech. scien. M., 2022. 377 p.
20. Yablokov A.E., Latyshev M.A., Blagoveshchenskiy I.G. Development of an intelligent system for technical monitoring of equipment using a universal sensor based on the STM32 microcontroller // Scientific and Technical Bulletin of the Volga region. 2024. № 10. pp. 143-146.
21. Yablokov A.E., Latyshev M.A., Shilina V.D., Poletaev A.A. ANN technologies in the problem of spectral vibration diagnostics of bakery equipment. 2024. Vol. 68. № 3. pp. 16-25.
22. Yablokov A.E. Vibration diagnostics of the main technological equipment of the grinding department of the mill: dis. ... cand. of tech. scien. M., 2001. 183 p.
23. Czech P. Vibration diagnosis of car motor engines // Acta technica corviniensis – Bulletin of engineering. 2010. Fascicule 1. Vol. III. pp. 37-42.
24. Kelly S. Graham. Advanced Vibration Analysis (Dekker Mechanical Engineering). 2013. 637 p.
25. Xue X., Dong Y., Wu X. Motion Induced Eddy Current Sensor for Non-Intrusive Vibration Measurement // IEEE Sensors Journal, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 735-744.
26. Yang Z., Wang S., Hong J., Li J. Analysis of electromagnetic exciting force and vibration of rotating armature permanent magnet synchronous motor // Journal of engineering. 2018, no. 17, pp. 1903-1908.

МАРКЕТИНГ И ФИНАНСЫ

Повышение эффективности пищевого предприятия на основе принципов бережливого производства (на примере Pims)

Теди Юрьевич Шнитман

Специалист эксперт

Российский биотехнологический университет

Москва, Россия

ya.ted711@yandex.ru

ORCID 0000-0000-0000-0000

Эльза Анатольевна Шарыкина

Кандидат экономических наук, доцент кафедры Управление бизнесом и сервисные технологии

Российский биотехнологический университет

Москва, Россия

elzagrishkova@gmail.com

ORCID 0000-0003-1082-7821

Поступила в редакцию 23.10.2025

Принята 15.11.2025

Опубликована 30.12.2025

УДК 67.025

EDN FDUKAE

БАК 4.3.3. Пищевые системы (технические науки)

OECD 02.11.JY. FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY

Аннотация

В рамках статьи были рассмотрены принципы бережливого производства и их практическое применение в деятельности компании Pims. В рамках исследования был обобщен теоретический опыт по теме исследования, были проанализированы основные финансовые показатели деятельности компании Pims, а также разработана система мероприятий для внедрения принципов бережливого производства. Актуальность темы исследования заключается в том, что в условиях стремления компаний к повышению эффективности производства внедрение принципов бережливого производства становится критически важным. Эффективное использование ресурсов, уменьшение объема отходов и энергопотребления становятся важными факторами не только для повышения конкурентоспособности компаний, но и для соответствия требованиям устойчивого развития и экологической ответственности. Цель исследования – разработать систему повышения эффективности деятельности компании за счет внедрения принципов бережливого производства. Методы исследования: анализ научной литературы, статистический и математический анализ, моделирование, обобщение. В ходе проведенного исследования была разработана система мероприятий для внедрения принципов бережливого производства в компании Pims. В статье рассматриваются особенности принципов бережливого производства, преимущества и недостатки инструментов бережливого производства. В рамках исследования были проанализированы показатели деятельности предприятия, а также описан план внедрения системы 5S. В конце приводится оценка экономической эффективности внедрения данной системы.

Ключевые слова

бережливое производство, система 5S, конкурентоспособность, общественное питание, предприятие общественного питания.

Введение

Повышение стандартов качества и гарантия безопасности продовольствия являются ключевыми приоритетами в агропромышленном секторе. Разработка и применение новых нормативных актов, регулирующих безопасность пищевых изделий, стимулируют руководство предприятий к активизации процессов интеграции данных изменений с целью оптимизации ресурсов, расширения коммерческого ассортимента и лучшего удовлетворения запросов потребителей. Эти усилия направлены на адаптацию производственной базы к изменяющимся условиям, улучшение характеристик товаров, повышение эффективности производственных процессов и минимизацию затрат, связанных с обеспечением качества. Реализация интегрированных систем управления качеством, применение принципов бережливого производства способствуют достижению этих стратегических задач (Татарникова, 2014).

Оптимизация использования производственных мощностей и сокращение затрат на технологические операции стоят в центре целей бережливого производства.

Бережливое производство – философия управления, разработанная японскими учеными, основывается на точном соблюдении трех важнейших составляющих, представленных на рисунке 1.



Рисунок 1. Составляющие бережливого производства

Материалы и методы исследования

А.В. Куприянов (Куприянов, 2020) высказывает мнение о критической важности начальной диагностики операций на уровне предприятия, разделяя их на основные и вспомогательные, а также анализа процессов создания ценности для повышения производственной эффективности. Предложенная методика решения проблем заключается в оптимизации организационной структуры через стратегическое планирование распределения производственных и поддерживающих подразделений. Это предотвращает ненужное перемещение рабочих, оборудования и материалов, устраняя образование излишних перемещений и логистических затрат, приводя к бережливому производству по маршруту от закупки до финальной отгрузки готовых изделий. Реализация таких мер способствует уменьшению перемешивания потоков на различных стадиях процесса, ведущему к уменьшению производственных потерь. Адаптация процессов подобным образом позволяет уменьшить объем внимания, требуемого для контрольных точек в рамках системы контроля НАССР, отвечающей

за безопасность продукции за счет чёткой организации работы и минимизации контакта между персоналом различных подразделений.

В нынешнем экономическом климате, концепция «Бережливого производства» становится основополагающим инструментом для управления бизнесом. Эта стратегия направлена на усиление конкурентоспособности предприятий посредством оптимизации бизнес-процессов и гарантии качества продукции или услуг, что делает ее одной из наиболее эффективных практик в бизнес-развитии. Основа «бережливого производства» – это вовлечение всех сотрудников в улучшение операций и ориентация на потребности клиентов. Этот принцип применяется в разнообразных экономических секторах по всему миру. Тем не менее, на предприятиях Беларуси принципы «бережливого производства» внедряются нерегулярно и без системного подхода, выявляя недостаток в методологической базе для его эффективного применения и подчеркивая важность изучения этой темы как с теоретической, так и с практической точек зрения.

По мнению Н.С. Давыдовой, «бережливое производство» означает стратегию управления производственными процессами, направленную на постоянное уменьшение затрат путем устранения всех видов потерь.

Любые процедуры, не повышающие ценность продукта в глазах покупателя, относятся к категории издержек. А.В. Вялов (Вялов, 2014) аргументирует, что в цепочке создания товаров реальную полезность для конца потребления формируют исключительно операции активного изменения состояния ресурсов. В то же время, действия, связанные с логистикой, хранением и аналогичные, в его представлении, приводят к сокращению общей стоимостной оценки продукции.

Необходимо определить ключевые принципы реализации Бережливого производства в организациях, указывающие на успешное применение данной концепции. Эффективное применение принципов Бережливого производства требует активного участия высшего руководства и переосмысления подходов к управлению на предприятии. Важно обеспечить вовлеченность всех уровней персонала в процесс изменений и создания бережливого производства. Развитие лидерских качеств и обучение работников методологиям бережливого производства необходимо для успешной реализации стратегии. Критический анализ существующих процессов и выявление мест нерационального использования ресурсов способствует устранению издержек. Основой бережливого производства является идея Кайзен, предполагающая бесконечный процесс улучшений в целях повышения эффективности и сокращения издержек.

Внедрение этих принципов повысит эффективность мониторинга за реализацией подхода к «бережливому производству» в сфере пищевой промышленности, активизирует сотрудников, улучшит управление ресурсами, сократит производственные расходы, и способствует усилению конкурентных преимуществ продукции.

Бережливое производство является результатом развития разнообразных методов управления, возникших на основе опыта японских компаний. Эта концепция объединяет широкий арсенал инструментов и методик, заимствованных из данных методов, в том числе и стратегические подходы к управлению.

Несмотря на эффективные примеры внедрения принципов бережливого производства в российских компаниях, есть преграды и сложности, которые замедляют или ограничивают проникновение этой методологии. Я.В. Денисова, А.С. Петрова и В.Ф. Сопин (Денисова, 2022) выделяют основные ограничивающие факторы для реализации стратегий бережливого производства на предприятиях России. Задержка во внедрении передовых технологий на государственном уровне по сравнению с ведущими мировыми компаниями часто связана с экономическими и политическими вызовами, которые страна переживала в заключительные десятилетия XX века.

Во-вторых, значимую проблему составляют психологические барьеры, с которыми сталкиваются сотрудники отечественных компаний. Ключевые препятствия включают трудности адаптации к изменениям в рабочей среде, настойчивое придерживание устаревших методик и сопротивление инновациям, что становится значительным препятствием для внедрения принципов Бережливого производства. Пробелы в эффективности управленческих подходов, недостаточное осознание важности

нововведений, неумение аргументированно доказать преимущества предстоящих изменений и продемонстрировать их выгоды также оказывают серьезное влияние на процесс реализации этих концепций.

В рамках третьего аналитического аспекта рассматривается управленческое поведение на предприятиях, где руководители часто предпочитают стратегию экстенсивного развития. Это включает опору на доступные природные, сырьевые и трудовые ресурсы, отставляя в стороне важность внимания к деталям и тонкостям в процессе производства. Такой подход ведет к управленческим решениям, не соответствующим принципам эффективности и рациональности производственных процессов, что мешает внедрению принципов бережливого производства и повышению его эффективности.

Исследовательская работа С.В. Грицуновой, В.Н. Мосиенко и С.А. Щетининой (Грицунова, 2020), посвященная анализу интеграции принципов бережливого производства, выявила, что основные препятствия связаны с мотивацией сотрудников, строительством эффективных взаимоотношений с поставщиками и рационализацией процессов управления запасами. Отмечена значительная задача преодоления консерватизма персонала, цепляющегося за устоявшиеся рабочие практики из-за боязни изменений, что становится барьером на пути внедрения новшеств. В этом контексте, разработка и внедрение эффективной системы мотивации, учитывающей интересы всех уровней персонала в крупных организациях, становится ключевой для успешного применения новаторских производственных стратегий.

Российские компании при внедрении и применении методологии бережливого производства (бережливого производства) сталкиваются с рядом ключевых трудностей и испытаний:

В первую очередь, подавляющее число работников, вовлеченных в создание продукта, проявляют скептицизм по отношению к инновациям, что обычно проявляется в неохоте принимать изменения, ассоциируемые с внедрением методик линейного производства.

Во-вторых, применение несоответствующего подхода к мотивации персонала отрицательно сказывается на их готовности к освоению нововведений. Несостоятельные методы стимулирования снижают участие в инновационной деятельности.

Третье препятствие представляет собой отсутствие достаточных финансовых стимулов, что может подрывать мотивацию сотрудников к активному участию и энтузиазму при внедрении основ бережливого производства. Также акцентируется внимание на том, что применяемая стратегия реализации не учитывает специфические черты конкретного бизнеса, являясь копированием подходов другой компании. Это может приводить к неэффективному использованию этой стратегии, пренебрегая уникальностью и потребностями данного предприятия.

Обычно руководители предприятий часто ограничивают своё понимание бережливого производства до его основных принципов. Такая поверхностная интерпретация основополагающих идей и стратегий бережливого метода менеджментом может становиться препятствием для эффективного внедрения и применения принципов бережливости.

Необходимо акцентировать внимание на том, что дефицит эффективности в организационной культуре, а также наличие организационных несоответствий серьезно препятствуют реализации бережливого производства в контексте российских предприятий. Перед тем как приступить к интеграции каких-либо стратегических изменений, крайне важным является налаживание продуктивной корпоративной культуры. Ее отсутствие может привести к тому, что вклад в модернизацию производственных процессов не оправдает ожиданий, аннулируя возможные выгоды от таких вложений.

Следовательно, аналитические данные свидетельствуют о том, что интегрирование концепций Бережливого производства в работу компаний в России сталкивается с значительными препонами. Эти трудности складываются из проблем при изменении организационной культуры и наличия у работников сопротивления изменениям на психологическом уровне. Отсутствие стимулов для эффективной работы, недостаточный интерес к процессу со стороны топ-менеджмента и ограниченное понимание принципов и целей бережливого производства препятствуют успешному внедрению этих концепций.

Результаты и обсуждение

В эпоху ресурсных ограничений и интенсивного соперничества на рынке, предприятия нацелены на увеличение своей операционной эффективности и на разработку продуктов и услуг, максимально отвечающих потребностям клиентов. В этом контексте бережливое производство выступает как ключевая стратегия для оптимизации бизнес-процессов и устранения излишеств, направленная на максимизацию добавленной стоимости продуктов и услуг при минимальных затратах и повышении качества, что в итоге обеспечивает рост удовлетворенности конечного потребителя.

Применение этого подхода не требует значительных капиталовложений, что является его значимым преимуществом. Однако многие управленцы сталкиваются с проблемой отсутствия понимания, с чего начать процесс внедрения Бережливого производства и какие стратегии и инструменты применять для эффективной оптимизации рабочих процессов. Это понятно, поскольку разработкой и внедрением системы бережливого производства должны заниматься квалифицированные специалисты, обладающие глубокими знаниями о нюансах и трудностях, связанных с использованием методик бережливого производства.

Концепция бережливого производства можно успешно адаптировать как в крупно- так и в мелкомасштабных предприятиях, целью которой является улучшение всех производственных и управленческих процессов, ведущее к созданию максимально эффективного бизнеса. Этот подход признан одной из передовых стратегий управления на глобальном уровне (Павлова, 2018). Его широкое распространение обусловлено высокой результативностью. Однако следует подчеркнуть, что методы бережливого производства адаптируются под специфические условия и ожидания конкретной компании или рынка, осуществляя выборочное применение и модификацию инструментов в соответствии с уникальными целями и задачами.

Концепция бережливого производства направлена на уменьшение и полное устранение потерь, которые непосредственно влияют на пониженную эффективность и способность предприятия конкурировать на рынке. Неизменно, потери встречаются на каждом шагу производственного и услуг процесса, ставя под угрозу успешность многих организаций. В этом контексте, растет число компаний, стремящихся оптимизировать свои процессы через применение принципов бережливого производства. Основные инструменты Lean, а также их достоинства и ограничения детально описаны в таблице 1.

Таблица 1. Выявление преимуществ и недостатков инструментов бережливого производства

Инструмент	Преимущества	Недостатки
Стандартизация	Оперативное выявление отклонений	Сложность изменения стандартов
Организация рабочего пространства (5S)	Улучшение условий труда Сокращение времени на поиск необходимого инструмента	При отсутствии контроля высока вероятность несоблюдения правил 5S
Карта потока создания ценности	Наглядное представление ценности и потерь	Отражение неполной информации
Всеобщее обслуживание оборудования	Сокращение времени на устранение неполадок	Высокие затраты на внедрение
Быстрая переналадка (SMED)	Быстрая реакция на изменение спроса	Необходимость в квалифицированном персонале
Защита от ошибок (Poka- Yoke)	Сокращение брака	Высокие затраты на оборудование
Канбан	Сокращение запасов Гибкость Сокращение «узких мест»	Не предназначен для долгосрочного планирования
Кайдзен	Непрерывные улучшения Работа в команде	Снижает влияния менеджмента

Практика бережливого производства предлагает передовой подход к уменьшению производственных издержек путем минимизации различных видов потерь. Эта стратегия проявила свою высокую результативность через опыт многочисленных лидирующих предприятий. Однако важно осознавать, что поверхностное понимание как самой концепции, так и ее инструментария, недостаточно. Ключевое значение приобретает наличие профессионалов, глубоко ознакомленных с основами бережливого производства и способных внедрять эти принципы на всех уровнях процесса. Следовательно, критически важно разработать эффективные механизмы стимулирования работников и обеспечить вовлеченность всего коллектива в процесс непрерывного улучшения.

Таким образом, целостность стратегии и непрерывное отслеживание операционных процедур критически важны. Это обеспечивает своевременное обнаружение и коррекцию недочетов. В то время как реализация принципов бережливого производства следует общепринятым методикам, необходимо адаптировать их к уникальным условиям отраслей.

Эти элементы оказывают значительное воздействие на процесс оценки бизнес-операций и формирование стратегии улучшения операционной эффективности предприятия. Проанализируем бизнес-активности компании Pims и создадим комплекс предложений по внедрению методологии бережливого производства. В пищевой промышленности основными особенностями являются:

1. маленький срок годности сырья и готовой продукции;
2. сезонность закупки сырья;
3. большая номенклатура видов продукции.

Данные факторы существенно влияют на анализ бизнес-процессов и разработку плана мероприятий по повышению эффективности деятельности компании. Проведем анализ деятельности компании Pims и разработаем систему мероприятий для внедрения принципов бережливого производства.

Pims – это компания, которая занимается изготовлением и продажей холодных напитков на основе ферментированного чая с фруктами и кремом. На 2024 год открыты около 40 точек в России и странах СНГ, еще около 80 находятся в процессе строительства. Проведем анализ основных финансовых показателей деятельности Pims (табл. 2).

Таблица 2. Динамика основных финансовых показателей компании

Показатель	Значение показателя, тыс. руб.		Изменение показателя			Среднегодовая величина, тыс. руб.
	2022 г.	2023 г.	тыс. руб.	±	%	
1. Выручка	192 236	260 562	+68 326	+35,5		226 399
2. Расходы по обычным видам деятельности	196 724	238 648	+41 924	+21,3		217 686
3. Прибыль (убыток) от продаж	-4 488	21 914	+26 402	↑		8 713
4. Прочие доходы и расходы, кроме процентов к уплате	-2 099	-3 963	-1 864	↓		-3 031
5. EBIT (прибыль до уплаты процентов и налогов)	-6 587	17 951	+24 538	↑		5 682
6. Проценты к уплате	273	770	+497	+182,1		522
7. Налоги на прибыль (доходы)	1 889	6 695	+4 806	+3,5 раза		4 292
8. Чистая прибыль (убыток)	-8 749	10 486	+19 235	↑		869

Таким образом, финансовое состояние предприятия значительно улучшилось в 2023 году. Выручка выросла на 35,5%, что существенно превышает рост расходов (21,3%). Компания вышла из убыточного состояния: прибыль от продаж увеличилась на 26,4 млн рублей, а чистая прибыль — на 19,2 млн рублей. Однако есть негативные тенденции: выросли проценты к уплате (+182,1%) и налоговые

выплаты (в 3,5 раза). Ухудшилась ситуация с прочими доходами и расходами. На рисунке 2 приведены показатели рентабельности за 2022 и 2023 годы.

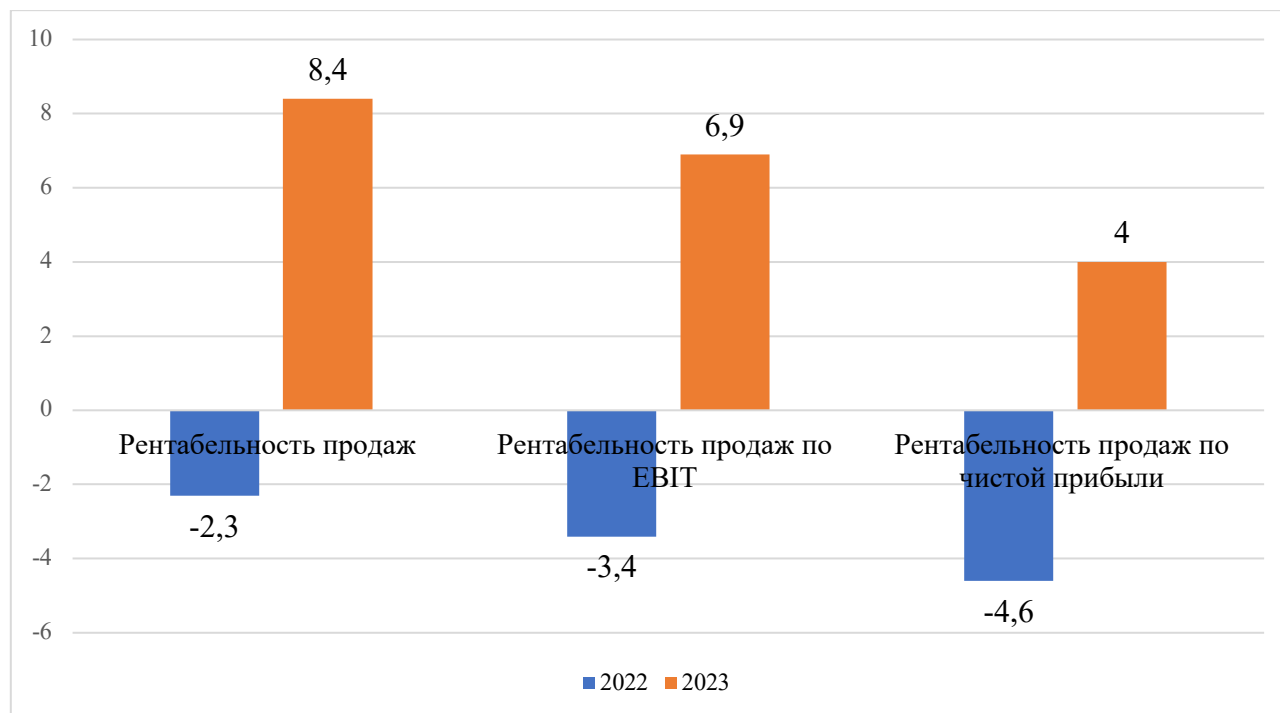


Рисунок 2. Показатели рентабельности за 2022-2023 годы

Анализ показателей рентабельности демонстрирует существенный положительный тренд в развитии компании. За отчетный период все ключевые показатели рентабельности вышли из отрицательной зоны и значительно улучшились. Рентабельность продаж показала впечатляющий рост на 10,7 процентных пунктов, достигнув значения 8,4%, что полностью соответствует отраслевому стандарту (от 8%). Рентабельность по EBIT улучшилась на 10,3 пункта, достигнув 6,9%, что свидетельствует об эффективной работе компании до вычета процентов и налогов. Рентабельность по чистой прибыли выросла на 8,6 процентных пунктов и достигла 4%, незначительно отставая от нормативного значения (не менее 5%). Такой значительный рост показателей рентабельности указывает на то, что компания существенно повысила эффективность своей деятельности и перешла от убыточной работы к прибыльной.

Таким образом, на основании финансового анализа деятельности компании Pims, был сделан вывод, что несмотря на небольшое отставание рентабельности по чистой прибыли от нормативного значения, общая динамика показателей является крайне позитивной и свидетельствует о том, что компания вышла на траекторию устойчивого развития и генерирования прибыли.

Именно поэтому, для поддержания роста предприятия и улучшения показателей деятельности предприятия необходимо внедрить принципы устойчивого развития. Рассмотрим порядок внедрения системы 5S (табл. 3).

Таблица 3. План внедрения системы 5S

Этап 5S	Цель	Действия	Ответственные	Сроки
Сортировка	Удалить ненужные предметы из рабочих зон.	Провести аудит цеха для выявления лишнего оборудования, сырья, тары. Отделить необходимое от ненужного (просроченные	Руководитель производства	1-2 недели

		ингредиенты, неиспользуемые ёмкости). Организовать утилизацию или передачу ненужных ресурсов.		
Систематизация	Организовать удобное хранение материалов и инструментов.	Разработать систему маркировки для чайных смесей, добавок, готовой продукции Зонировать цех: выделить зоны ферментации, розлива, упаковки. Установить стеллажи с подписанными контейнерами для ингредиентов.	Логисты, мастера цеха	2-3 недели
Чистота	Обеспечить чистоту на всех этапах производства.	Составить график ежедневной уборки с дезинфекцией оборудования. Проверить вентиляцию и фильтрацию воздуха. Обучить сотрудников нормам гигиены и санитарии.	Технический отдел	Постоянно
Стандартизация	Закрепить правила как часть рабочих процессов.	Создать чек-листы для проверки чистоты и порядка. Утвердить стандарты хранения чайных культур и готовой продукции. Разместить визуальные инструкции (схемы, таблицы) в цеху.	Менеджер по качеству	3-4 недели
Совершенствование	Поддерживать систему и непрерывно улучшать её.	Проводить еженедельные проверки соблюдения стандартов. Внедрить KPI для сотрудников, связанные с порядком и чистотой. Собирать и внедрять предложения работников по оптимизации.	Руководство, отдел качества	Постоянно

Внедрение системы 5S на чайном производстве оптимизирует организацию рабочих зон, устранил хаос и повысит безопасность продукции. Сортировка и систематизация упорядочат ресурсы, чистота и стандартизация обеспечат соблюдение санитарных норм, а совершенствование закрепит культуру непрерывных улучшений. Это сократит издержки, повысит качество чая и создаст базу для внедрения продвинутых методик управления. Успех зависит от вовлеченности команды и контроля этапов. В таблице 4 приведены ожидаемые результаты после внедрения системы 5S.

Таблица 4. Предполагаемые результаты от внедрения системы 5S

Показатель	До внедрения	После внедрения	Изменение
Время на поиск материалов (мин/операция)	6,3	2,8	-55%

Количество брака (кг/месяц)	137	42	-69%
Простои оборудования (часы/месяц)	43,5	12,1	-72%
Расход электроэнергии (кВт/час)	1230	1065	-13,4%
Производительность труда (кг/час)	37,2	46,8	+25,8%
Затраты на хранение (руб./мес.)	152,000	103,000	-32%
Время переналадки оборудования (мин)	53	23	-56,6%
Уровень удовлетворенности сотрудников (%)	67	84	+25,4%
Время на уборку рабочего места (мин/смена)	52	21	-59,6%

Внедрение системы 5S позволит достичь значительных улучшений во всех ключевых областях. Время на поиск материалов сократится в 2,5 раза, а время переналадки оборудования и уборки рабочих мест уменьшится более чем в 2 раза. Это обеспечит рост производительности труда на 25,8% и сокращение простоев оборудования на 72%.

Экономическая эффективность также будет существенной: снизятся затраты на хранение на 32%, расход электроэнергии оптимизируется на 13,4%, а количество брака уменьшится на 69%. Важным результатом станет повышение удовлетворенности сотрудников на 25,4% благодаря созданию более организованной и комфортной рабочей среды.

Таким образом, внедрение 5S обеспечит комплексную оптимизацию производства, повышение качества продукции и снижение операционных затрат.

Заключение

Внедрение принципов бережливого производства в российских компаниях сталкивается с системными вызовами, ключевыми из которых являются сопротивление изменениям со стороны персонала и отсутствие сформированной культуры непрерывных улучшений. Критически важным становится создание «бережливого мышления» — перехода от реактивного устранения проблем к проактивному предупреждению потерь через стандартизацию процессов и вовлечение всех уровней персонала.

В ходе проведенного исследования были проанализированы основные показатели деятельности компании Pims. В ходе анализа был сделан вывод о необходимости внедрения системы 5S, а также были описаны основные этапы внедрения системы в деятельность компании. Внедрение системы 5S должно обеспечить комплексную оптимизацию производства: прогнозируется рост производительности на 25,8%, сокращение простоев оборудования на 72%, снижение затрат на хранение на 32% и количества брака на 69%. При этом время на поиск материалов должно сократиться в 2,5 раза, а затраты на электроэнергию оптимизируются на 13,4%. Дополнительным преимуществом станет повышение удовлетворенности сотрудников на 25,4%.

Таким образом, внедрение системы 5S поможет оптимизировать основные бизнес-процессы пищевого предприятия, увеличить прибыль предприятия и уменьшить основные затраты.

Список литературы

1. Бережливое производство особый подход к управлению организацией // food-fishtechnology.ru. 2025.
2. Вялов А.В. Бережливое производство: учеб. пос. Комсомольск-на-Амуре: КНАГТУ, 2014. 100 с.
3. Бережливое производство. Основные методы и инструменты. ГОСТ Р 564072015 // normativ.kontur.ru. 2015. <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=9&documentId=367587>
4. Грицунова С.В., Мосиенко В.Н., Щетинина С.А. О применении концепции бережливого производства в менеджменте российских компаний // Образование, наука и технологии: актуальные вопросы, инновации и достижения: мат. межд. науч.-прак. конф. (30 апреля 2020 г., Москва). М, 2020. С. 110-114.

5. Давыдова Н.С. Система менеджмента бережливого производства и устойчивость лин-трансформаций // Новые технологии. 2021. № 2. С. 35-42.
6. Денисова Я.В., Петрова А.С., Сопин В.Ф. Оптимизация производственного процесса путем внедрения методов бережливого производства // Вестник ВГУИТ. 2022. № 2(92). С. 67-74.
7. Казарин В. Ценность глазами бережливого производства // Азбука бережливого производства. 2017. №12. С. 47-58.
8. Корнева М.С., Хомякова А.А. Совершенствование системы управления производством на основе внедрения концепции бережливого производства // Экономика и управление: проблемы, решения. 2016. № 39. С. 73-81.
9. Куприянов А.В. Перспективы внедрения бережливого производства на предприятиях пищевой промышленности // Символ науки. 2020. № 121.
10. Методические основы внедрения бережливого производства // lean-kaizen.ru. 2025. <https://center-kaizen.ru/baza-znaniy/kak-izmeritnm-effektivnostnm-i-prizhivaemostnm-berezhivogo-proizvovstva-v-kompanii-metovy-i-instrumenty-viya-oczenki-rezuimntatov-vnevreniya-berezhiivih-praktik/>
11. Павлова А.С., О.И. Сергиенко, Е.С. Трохов. Бережливое производство в системе корпоративного управления на российских предприятиях // Экономика и экологический менеджмент. 2018. № 3. С. 90-105.
12. Потери в бережливом производстве: виды убытков и способы борьбы с ними // vt-metall.ru. 2022. <https://vt-metall.ru/articles/285-poteri-v-berezhlivom-proizvodstve/>
13. Ротер М. Тойота Ката. Лидерство, менеджмент и развитие сотрудников для достижения выдающихся результатов. СПб.: Питер-Пресс. 2014. 304 с.
14. Татарникова Л.И. Организация работы с кайдзен-предложениями // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 11. С. 316-320.

Improving the efficiency of food enterprise based on the principles of lean production (on the example of Pims)

Tedi Yu. Schnitman

Specialist expert

Russian University of Biotechnology

Moscow, Russia

ya.ted711@yandex.ru

ORCID 0000-0000-0000-0000

Elsa A. Sharykina

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department of Business Management and Service Technologies

Russian University of Biotechnology

Moscow, Russia

elzagrishkova@gmail.com

ORCID 0000-0003-1082-7821

Received 23.10.2025

Accepted 15.11.2025

Published 30.12.2025

UDC 67.025
EDN FDUKAE
VAK 4.3.3. Food systems (technical sciences)
OECD 02.11.JY. FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY

Abstract

The article reviewed the principles of lean manufacturing and their practical application in the activities of Pims. As part of the study, theoretical experience on the research topic was summarized, the main financial performance indicators of Pims were analyzed, and a system of measures was developed to implement the principles of lean manufacturing. The relevance of the research topic lies in the fact that in the context of companies' desire to increase production efficiency, the introduction of lean manufacturing principles becomes critically important. Efficient use of resources, reduction of waste and energy consumption are becoming important factors not only for increasing the competitiveness of companies, but also for meeting the requirements of sustainable development and environmental responsibility. The purpose of the research is to develop a system to improve the efficiency of the company through the introduction of lean manufacturing principles. Research methods: analysis of scientific literature, statistical and mathematical analysis, modeling, generalization. In the course of the research, a system of measures was developed to implement the principles of lean manufacturing at Pims. The article discusses the features of the principles of lean manufacturing, the advantages and disadvantages of lean manufacturing tools. As part of the study, the company's performance indicators were analyzed, and a plan for the implementation of the 5S system was described. At the end, an assessment of the economic efficiency of the implementation of this system is given.

Keywords

lean manufacturing, 5S system, competitiveness, catering, catering company.

References

1. Lean manufacturing is a special approach to managing an organization // food-fishtechnology.ru. 2025.
2. Vyalov A.V. Lean manufacturing: a textbook. Komsomolsk-on-Amur: Komsomolsk-on-Amur State Technical University, 2014. 100 p.
3. Lean manufacturing. Basic methods and tools. GOST R 564072015 // normativ.kontur.ru.2015. <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=9&documentId=367587>
4. Gritsunova S.V., Mosienko V.N., Shchetinina S.A. On the application of the concept of lean production in the management of Russian companies // Education, science and technology: current issues, innovations and achievements: mat. of the Inter. scien. and prac. conf. (April 30, 2020, Moscow). M., 2020. pp. 110-114.
5. Davydova N.S. Lean production management system and sustainability of line transformations // New technologies. 2021. № 2. pp. 35-42.
6. Denisova Ya.V., Petrova A.S., Sopin V.F. Optimization of the production process through the introduction of lean production methods // VSUIT bulletin. 2022. № 2(92). pp. 67-74.
7. Kazarin V. Value through the eyes of lean production // ABC of lean production. 2017. № 12. pp. 47-58.
8. Korneva M.S., Khomyakova A.A. Improvement of the production management system based on the introduction of the lean production concept // Economics and management: problems, solutions. 2016. № 39. pp. 73-81.
9. Kupriyanov A.V. Prospects for the introduction of lean manufacturing in the food industry // A symbol of science. 2020. № 121.
10. Methodological foundations of lean manufacturing implementation // lean-kaizen.ru. 2025. <https://center-kaizen.ru/baza-znaniy/kak-izmeritnm-effektivnostnm-i-prizhivaemostnm-berezhivogo-proizvodstva-v-kompanii-metovy-i-instrumenty-viya-ocenki-rezuimnmtatov-vnevreniya-berezhivyh-praktik/>

11. Pavlova A.S., O.I. Sergienko, E.S. Trokhov. Lean manufacturing in the corporate governance system at Russian enterprises // Economics and environmental management. 2018. № 3. pp. 90-105.
12. Losses in lean manufacturing: types of losses and ways to deal with them // vt-metall.ru. 2022. <https://vt-metall.ru/articles/285-poteri-v-berezhlivom-proizvodstve/>
13. Rother M. Toyota Kata. Leadership, management and employee development to achieve outstanding results. SPb.: Peter-Press. 2014. 304 p.
14. Tatarnikova L.I. Organization of work with kaizen proposals // Irkutsk State Technical University bulletin. 2014. № 11. pp. 316-320.

ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование возможностей радиационной стерилизации хлебобулочной продукции в Федеральном медицинском биофизическом центре имени А.И. Бурназяна в контексте производства массовых и функциональных видов хлеба в сотрудничестве с Российским биотехнологическим университетом

Олег Михайлович Омельченко

Кандидат экономических наук, доцент, директор
Центр коммерциализации и трансфера технологий, Российский биотехнологический университет
Москва, Россия
Omelchenko_OM@roshleb.com
ORCID 0000-0000-0000-0000

Александр Витальевич Белоусов

Кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией Государственный научный центр Российской Федерации – Федерального медицинского биофизического центра им. ак. А.И. Бурназяна
Федерального медико-биологического агентства России
Москва, Россия
Belousov_AV@fmbamail.ru
ORCID 0000-0000-0000-0000

Поступила в редакцию 02.10.2025

Принята 13.11.2025

Опубликована 30.12.2025

УДК 67.71

EDN ETMHNВ

БАК 4.3.5. Биотехнология продуктов питания и биологически активных веществ (технические науки)

OECD 02.11.JY. FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY

Аннотация

Исследование направлено на всестороннее изучение возможностей и перспектив радиационной стерилизации пищевой и хлебобулочной продукции, последовательно проходя через все основные уровни исследовательской работы от фундаментальных лабораторных испытаний до проектирования промышленных производственных линий выпуска стабильных радиационных хлебобулочных изделий. На протяжении исследования детально рассматриваются этапы реализации предлагаемой технологии, выделяются важнейшие научные направления и практические мероприятия, среди которых особое место занимают выбор оптимального значения поглощенной дозы ионизирующего излучения, установление степени устойчивости готовой продукции к воздействию данного вида излучений, разработка соответствующей нормативной и методической документации и обзор существующих и перспективных технологических линий. В работе представлены итоги глубокого анализа влияния ионизирующих излучений на качество пищевых продуктов, проведенного путем подробного рассмотрения современной практики так называемой «радиационной стерилизации». Отдельно исследуется текущее состояние производственной инфраструктуры центров стерилизации, предназначенной для массового внедрения технологий радиационного обеззараживания продуктов питания. Делается вывод об оптимальном значении поглощенной дозы ионизирующего излучения, позволяющий гарантированно уничтожать болезнетворные микроорганизмы при минимальном влиянии на физико-химические, органолептические параметры конечных продуктов, с максимальным сохранением структуры и прочности. Проанализированы выводы предыдущих исследований,

подтвердившие высокую результативность метода радиационной обработки и открывающие новые возможности для дальнейшего совершенствования условий технологического процесса, позволяющие существенно увеличить объемы выпуска качественной продукции. Таким образом, данная работа представляет собой важный источник знаний, аккумулирующий последние достижения науки и техники в области радиационной стерилизации пищевой продукции, выявляет тенденции дальнейшего научно-исследовательского и прикладного характера, направленные на углубленное понимание механизмов воздействия ионизирующего излучения на длительно хранящиеся продовольственные товары.

Ключевые слова

радиационная стерилизация, потенциальные последствия стерилизующего воздействия, технологический процесс радиационного облучения, методы радиационной обработки, гигиенические стандарты пищевой промышленности.

Введение

За последнее десятилетие применение радиационного облучения приобрело особую значимость вследствие признания его эффективности ведущими странами мира. Согласно отчетам Всемирной Организации Здравоохранения (ВОЗ) и Международного Агентства по Атомной Энергии (МАГАТЭ), примерно шестьдесят государств узаконили данную технологическую процедуру для стерилизации и улучшения сохраняемости широкого спектра пищевых товаров, включая свежую растительную продукцию, мясо, рыбу, орехоплодные культуры, злаковые растения и сухие продукты питания (Kume, 2009). Данный подход получил значительное развитие благодаря усилиям международного сообщества, направленным на разработку унифицированных норм качества и безопасности продуктов, подвергнутых радиационному воздействию.

В современной России подобная обработка разрешена с 2017 года, когда были введены в действие соответствующие госстандарты (Чиж, 2011). Сейчас в нашей стране действуют четыре гамма-установки и 18 установок на базе ускорителей электронов.

Первые весомые доказательства полезности радиационной обработки появились еще в середине прошлого столетия благодаря результатам исследований ВОЗ и МАГАТЭ (Farkas, 2004). Установлено, что корректно подобранные дозы облучения обеспечивают полную безопасность потребляемой пищи, а корректно подобранные источники ионизирующего излучения предотвращают возникновение наведенной радиоактивности. Многократные лабораторные испытания продемонстрировали сохранение содержания ключевых нутриентов, таких как витамины, минеральные соли и микроэлементы, даже после проведения радиационной обработки.

Современные эмпирические данные подтверждают высокую эффективность радиационного метода в подавлении бактерий, плесени и патогенов, являющихся причиной быстрой деградации продуктов и распространения инфекций (Munir, 2018). Особенную ценность данная технология представляет для скоропортящихся категорий продуктов, таких как зерновые культуры, хлебобулочные изделия, сухофрукты и замороженные продукты. Применение радиационной обработки позволяет решить ряд значимых проблем современной пищевой индустрии: увеличить срок годности изделий, снизить риски возникновения пищевых отравлений и обеспечить высокий уровень качественных характеристик продукции. За счет уничтожения микроорганизмов и патогенных факторов без нагрева или добавления синтетических консервирующих компонентов обеспечивается сохранение питательной ценности, вкусовых качеств, запаха и окраски продукта, одновременно повышается степень биологической безопасности конечного товара.

Несмотря на достигнутый прогресс в области радиационных технологий, ученые до сих пор интенсивно исследуют потенциальные модификации химической структуры продуктов при высоких уровнях облучения (Ito, 2019). Отдельные наблюдения свидетельствуют о возможных ограничениях, обусловленных изменениями белковых структур и углеводов в случае высоких значений поглощенной дозы. Таким образом, актуальной задачей современных научных изысканий становится оптимизация режимов радиационного воздействия, минимизирующая нежелательные последствия и

обеспечивающая поддержание высокого уровня качества готовых продуктов, а также совершенствование инженерно-технических решений, направленных на внедрение реализуемых в практике способов производства.

Материалы и методы исследования

Радиационная стерилизация продовольственных ресурсов представляет собой перспективное направление научных исследований и технических инноваций современного периода. Данный метод характеризуется высоким уровнем эффективности в уничтожении патогенных микроорганизмов, значительным увеличением сроков хранения готовой продукции, сохраняя при этом оптимальные сенсорные качества и питательную ценность продуктов (Gaynutdinov, 2020). Использование указанного метода позволяет обеспечить надежную защиту продуктов питания от негативных факторов внешней среды, предупреждая развитие процессов микробиологической порчи.

Концепция радиационной обработки впервые была сформулирована еще в середине прошлого столетия (Acharya, 2004). Впоследствии ученые ряда государств интенсивно занимались исследованиями в данной области, направленных на изучение возможностей консервирования продуктов питания посредством воздействия ионизирующего излучения. Особо значимый вклад был внесен специалистами. В СССР этим занимался Институт Питания АМН СССР и Институт гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана, продемонстрировавшие экспериментально обоснованную результативность данного подхода применительно ко многим видам продовольственного сырья (Павлов, 2016).

Установлено, что ионизирующие излучения обладают уникальной способностью проникновения через материал на значительную глубину, обеспечивающую устранение возбудителей болезней, включая бактериальные культуры, грибковые споры и дрожжевые клетки (Thayer, 2006). Исследования выявили прямую зависимость результатов стерилизационного процесса от характеристик применяемого излучения, таких как тип и энергия частиц, энергетический спектр, плотность потока и т.д. Однако в первом приближении считается, что основной величиной является поглощенная доза излучения. Оптимизация указанных параметров позволила добиться эффективного подавления микрофлоры при сохранении высокого уровня функциональности и качества обработанных продуктов.

Тем не менее дальнейшее углубленное исследование возможности применения радиационных технологий для обеспечения санитарной чистоты хлебобулочных изделий остается актуальным направлением научной деятельности (Слабыня, 2023). Это обусловлено рядом особенностей структуры и состава хлебобулочного сырья, отличающегося повышенной степенью химической сложности, спецификой физико-химического строения и чувствительностью к внешним условиям. Разработка адекватных методик радиационной обработки должна учитывать данные факторы, учитывая сложную структуру хлебобулочных изделий, содержащих значительное количество органических веществ, обладающих индивидуальными реакционными свойствами.

Таким образом, несмотря на признанную положительную роль радиационной стерилизации в большинстве областей пищевой промышленности, вопрос ее адаптации непосредственно к хлебобулочному производству нуждается в дополнительном изучении и детальной проработке среди ученых и инженеров-технологов соответствующего профиля.

Результаты и обсуждение

Современная наука сталкивается с рядом сложных многоаспектных проблем, преодоление которых открывает путь к широкому применению методов радиационной обработки в хлебопечении. К числу приоритетных вопросов относятся:

1. Определение и достижение оптимального диапазона поглощенной дозы. Главным образом требуется установить две величины: минимальную стерилизующую дозу позволяющую эффективно уничтожать патогенные микроорганизмы, и максимальную дозу, при которой минимально влияние на физико-химический состав, питательную ценность и потребительские свойства хлебобулочных изделий (Gaynutdinov, 2020). Основной целью данного направления является достижение баланса между уровнем дезактивации микрофлоры и сохранением функциональности

продукта. А также подбор оптимальных условий облучения (тип излучения, его энергия, размеры облучаемого объекта, скорость конвейера и т.д.), позволяющих проводить радиационную обработку в установленном диапазоне поглощенных доз.

2. Изучение механизмов изменения биологического состава и физико-химических характеристик хлеба под влиянием радиационного излучения/ Значительное внимание уделено исследованию особенностей взаимодействий ионизирующей радиации с биологическими молекулами (витамины, аминокислоты, углеводы) (Ito, 2019). Проводится оценка повреждающего эффекта радиации на макромолекулярные структуры, что крайне важно для подтверждения безопасности обработанных продуктов и предотвращения негативных последствий для здоровья потребителей.

3. Разработка специальных технологических решений и производственного оборудования/ Требуется проектирование специализированных автоматизированных линий и высокотехнологичного оборудования, обеспечивающего надежную обработку больших объемов хлебобулочной продукции без снижения качественных показателей (Indiarto, 2020). Данный аспект предполагает разработку технических регламентов и установление оптимальных рабочих параметров промышленных устройств.

4. Нормативно-техническое регулирование процесса радиационной стерилизации/ Создание нормативных документов и стандартов, регулирующих использование метода радиационного обеззараживания, является необходимым условием успешного внедрения инноваций в промышленную практику. Данные стандарты должны включать критерии контроля качества обработанного сырья и готовых изделий, что обеспечит легитимизацию нового подхода в пищевой индустрии (Чиж, 2011).

Предполагается, что дальнейшие исследования будут способствовать созданию прикладных технологий и приведут к следующему результату:

1. Созданию высокопроизводительных линий радиационной стерилизации хлебобулочных изделий и других скоропортящихся продуктов питания, удовлетворяющих международным требованиям качества и безопасности (Kume, 2009).

2. Повышению информированности населения о преимуществах радиационной стерилизации, формированию позитивного отношения общественности к данному процессу и осознанию его полезности.

3. Расширению применяемости технологии и снижения заболеваемости инфекциями, вызванными употреблением продуктов питания, подвергшегося порче в результате различных факторов, но не имеющих видимых следов повреждения, значительному сокращению объема отходов продовольствия и повышению общего качества предлагаемой продукции.

Таким образом, перед учеными стоит задача разработки специализированной модели радиационной стерилизации, соответствующей современным требованиям хлебопекарной отрасли и обладающей потенциалом широкого распространения в промышленной практике (Слабыня, 2023).

Обозначенные задачи современных научных исследований в области радиационной стерилизации хлебобулочных изделий предлагается решать в несколько этапов, составляющих суть продолжаемой после проводимого исследования работы.

Этап 1. Экспериментальное исследование зависимости показателей качества хлебобулочных изделий от параметров радиационной обработки. Стерилизационные процессы пищевых продуктов посредством воздействия ионизирующей радиации характеризуются применением определенной величины поглощенной дозы ионизирующего излучения, позволяющей эффективно ликвидировать контаминантов-микроорганизмов, провоцирующих биodeградацию продовольствия, с минимальным воздействием на структурно-функциональные характеристики субстрата.

Целью первого этапа исследования является установление оптимального диапазона поглощенных доз, обеспечивающего максимальную эрадикацию микрофлоры без выраженного ущерба качеству хлеба. Эффективность деактивации патогенов: Достижение максимального уровня элиминации условно-патогенных бактериальных штаммов и грибковых форм, препятствующее микробиологической порче продукта и предотвращающее развитие пищевой токсикоинфекции. Отсутствие деградации физико-химических свойств продукта:

Минимизация трансформаций химической структуры, органолептических показателей, и реологических характеристик хлеба после прохождения стадии радиационного обеззараживания. Эмпирически доказано, что диапазон от 10 до 20 кГр соответствует оптимальным условиям радиационно-биологического эффекта, гарантирующим гибель значительной популяции микроорганизмов при сохранении приемлемых органолептических характеристик конечной продукции (Timakova, 2017).

Выбор точной дозировки должен учитывать несколько ключевых факторов:

- первоначальную микробную нагрузку применяемых ингредиентов теста (дрожжи, мука, соль);
- микробиологический профиль доминирующей флоры в образце;
- специфику рецептуры исследуемого хлебобулочного изделия.

Согласно данным ранее проводимых исследований превышение рекомендуемых лимитов (более 30 кГр) влечет негативные последствия, включая деструкцию клеточной ткани хлебного мякиша, избыточное образование меланоидинов, изменение аромата, ухудшение пластичности и снижение привлекательности товара для потребителя (Ito, 2019).

Таблица 1. Рекомендуемая дозировка облучения для хлебобулочных изделий

Категория хлеба	Рекомендуемая доза облучения (кГр)
Белый хлеб	10-15
Черный хлеб	12-18
Изделия из цельнозерновой муки	15-20
Выпечка и кондитерские изделия	10-15

С целью повышения эффективности санитарной обработки продовольственных товаров и минимизации рисков передачи инфекционных агентов применяется специализированная методика расчета рекомендованной поглощенной дозы.

Этап 2. Формирование научно-методологических основ стандартизации радиационной стерилизации хлебобулочной продукции. Достижение высокого уровня санитарно-эпидемиологической безопасности и функциональной пригодности хлебобулочных изделий, подвергнутых воздействию ионизирующих излучений, требует формирования комплексных правовых актов и руководящих материалов, регламентирующих процесс радиационной стерилизации (Чиж, 2011). Важнейшими направлениями работ данного этапа выступают разработка и внедрение отраслевых стандартов и соответствующих методических рекомендаций, что включает:

1. Формулирование унифицированных процедур сертификации: Определение базовых критериев радиационной нагрузки, допустимых пределов и алгоритма верификации соответствия готовых образцов установленным техническим требованиям (Кодекс, 2007).

2. Организацию регулярного мониторинга производственного цикла: Периодическое обследование производственных площадок на предмет выполнения действующих законодательных норм, лабораторные испытания хлебобулочных изделий на микробиологические показатели и оценку точности настройки технологического оборудования, используемого для реализации радиационного воздействия (Санжарова, 2013).

3. Систематическую поверку аппаратных комплексов и метрологическое обеспечение измерительной техники, задействованной в контроле полученных доз облучения (Ершов, 2013).

4. Реализацию комплекса предложенных мер позволяет гарантировать защиту прав потребителей, поддерживая требуемый уровень гигиенической чистоты выпускаемой продукции и укрепляя эпидемиологическую стабильность на рынке хлебобулочных товаров.

Этап 3. Испытание технологий и подбор оборудования. На данном этапе ключевое внимание уделяется тщательному изучению существующих методов радиационной стерилизации и проведению испытаний соответствующего оборудования (Indiarto, 2020). Целью является адаптация существующих решений таким образом, чтобы обеспечить эффективное обеззараживание непосредственно в процессе

упаковки хлебобулочной продукции. Это позволит существенно сократить затраты энергии и уменьшить продолжительность процесса, обеспечивая продукт необходимым уровнем защиты от микробиологических загрязнений, одновременно увеличивая срок годности продукта и открывая новые перспективы для расширения возможностей транспортировки и распространения товара среди потребителей. Этап включает:

1. Использование линейных ускорителей электронов: одним из применяемых в существующих центрах стерилизации вариантов являются установки типа ЛУЭ-8/5, способные производить поток высокоэнергетичных электронов (с энергией порядка 8–10 МэВ). Такие системы успешно применяются для эффективной стерилизации пищевых продуктов различного типа, включая хлебобулочные изделия (Gaynutdinov, 2020).

2. Возможность реализации двустороннего облучения: Современные технологические решения позволяют проводить радиационную обработку с нескольких, как правило двух, сторон, повышая качество обработки и гарантируя ее максимальную равномерность, что особенно актуально для обеспечения стабильности качества конечного продукта.

3. Оптимизацию рецептуры: важно учитывать также необходимость модификации составов самих хлебобулочных изделий. К примеру, замена традиционного сахара на глюкозу или инвертный сахар способна улучшить стойкость продукта к радиационным нагрузкам, позволяя добиться оптимального баланса между качеством готового изделия и эффективностью применяемого метода стерилизации (Sultan, 2018).

Этап 4. Разработка модели и верификация в реальных промышленных условиях. Целью настоящего этапа является экспериментальная апробация перспективной технологии радиационной стерилизации в реальной производственной среде центра радиационной стерилизации в целях проектирования технологических линий для массового применения технологии (Слабыня, 2023).

Для организации промышленной линии, демонстрирующей технологическую результативность предложенного метода в рамках функционирующих объектов пищевой индустрии и адаптации технологии для применения ее в условиях промышленного производства потребуется моделирование с учетом особенностей пищевого производства.

Визуализация существующих элементов линии радиационного облучения в центре им. А.И. Бурназяна приведена на рисунках 1-4.

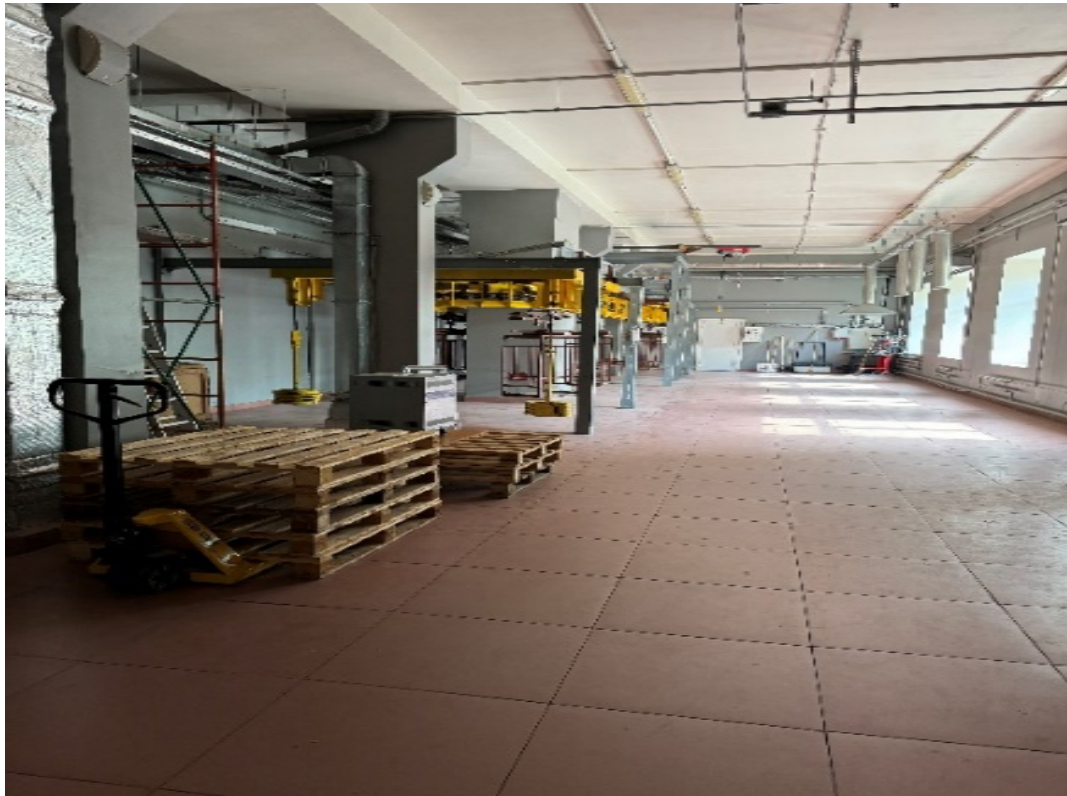


Рисунок 1. Участок зоны логистического участка



Рисунок 2. Участок зоны радиационного воздействия



Рисунок 3. Мониторинг зоны движения продукта в зоне воздействия



Рисунок 4. Спектрофотометр для контроля дозы облучения в продукте

Принятие обоснованного управленческого решения относительно внедрения радиационных методов стерилизации продовольственных товаров требует предварительного выполнения детального экономического анализа. Необходимо количественно определить капитальные расходы на проектирование и закупку специализированного технологического оснащения, монтаж экранирующих

конструкций и создание специализированных помещений для осуществления процессов облучения. Параллельно надлежит осуществить оценку ожидаемого эффекта от увеличения продолжительности хранения конечной продукции, уменьшения объема брака и затрат на ликвидацию непригодных материалов. Предположительно, инвестиционные вложения окупятся вследствие повышения общей производительности предприятия и улучшения показателей сохраняемости товарных единиц.

Дополнительно значимым аспектом деятельности на данном этапе выступает выполнение комплексного маркетингового изучения потребительского спроса и общественного мнения относительно новшества. Целесообразно выявить восприятие целевой аудиторией качественных характеристик и степени безопасности хлебобулочных изделий после воздействия методами радиационной стерилизации. Создание положительного имиджа инновационного продукта предполагает реализацию информационно-просветительской кампании, направленной на формирование объективного представления у потребителей о преимуществах предлагаемого технического решения и опровержение существующих стереотипов относительно негативного влияния радиоактивного излучения на здоровье человека. Выполнение указанного комплекса мер будет способствовать формированию оптимальных условий для успешной коммерциализации инновационных решений и дальнейшему распространению технологий радиационной стерилизации на рынке продовольствия.

Радиационная стерилизация представляет собой эффективный инструмент достижения микробиологической чистоты продуктов питания посредством воздействия высокоэнергетического ионизирующего излучения. Среди известных способов наибольшего распространения – три основных типа источников (табл. 1):

1. Гамма-излучение изотопов ^{60}Co (средняя энергия 1.25 МэВ) и ^{137}Cs (средняя энергия 0.661 МэВ).
2. Ускорительные источники электронов с энергией до 10 МэВ.
3. Источники тормозного (тормозного рентгеновского) излучения, генерируемого при торможении электронов высоких энергий в мишенях с высоким атомным номером.

Таблица 1. Характеристики источников ионизирующего излучения

Тип излучения	Преимущества	Недостатки
Гамма-излучение	Достаточно высокая проникающая способность	Высокие требования к радиационной и экологической безопасности. Постоянный источник радиоактивности. Необходимость замены источников из-за уменьшения активности.
Пучки электронов	Высокая мощность дозы и, соответственно, скорость обработки. Генерирующий источник	Не высокая проникающая способность.
Тормозное излучение	Высокая проникающая способность. Генерирующий источник.	Мощность дозы меньше, чем у электронных пучков.

Современные промышленные процессы основываются на применении двух типов установок для радиационного обеззараживания пищевых продуктов:

➤ Комплексы на основе гамма-излучателей. Представляют собой специализированные автоматизированные производственные линии, оборудованные радионуклидными источниками ионизирующего излучения. Данные системы предназначены для непрерывного массированного производственного процесса, характеризующегося высоким уровнем производительности и возможностью обработки различной упаковки и типа продукции.

➤ Комплексы на основе ускорителей электронов. Основываются на современных устройствах ускорения заряженных частиц, таких как линейные ускорители или бетатроны. Изначально созданные для медицинских целей, подобные установки стали внедряться в пищевую промышленность для локальной обработки мелкогазмерных объектов, таких как хлебобулочные изделия, порошковые вещества и т.п. Как правило, все современные центры радиационной обработки на основе ускорителей электронов предполагают возможность работы в двух режимах: электронном и режиме генерации тормозного излучения (при оснащении тормозной мишени). Выбор конкретной технологии зависит от особенностей организации производственных процессов предприятия и уникальных характеристик физических и химических свойств продукции, подлежащей обработке.

Необходимо отметить, что вопрос разработки прикладных технологий облучения продуктов питания уже сейчас приводит к созданию портативных установок, так на рисунке 5 представлена экспериментальная установка, созданная Научным коллективом НИИЯФ МГУ, разрабатывающим ускорители электронов с 1959 года. С 2015 года сотрудники физического факультета МГУ совместно с химическим и биологическим факультетами проводят экспериментальные исследования в области оптимизации и повышения эффективности обработки продуктов питания ускоренными электронами и тормозными фотонами различных энергий.



Рисунок 5. Экспериментальная установка в НИИЯФ МГУ

Практика мирового внедрения технологий ионизирующего облучения при обработке продуктов питания достигла значительного прогресса при создании промышленных технологий, особого внимания, по мнению авторов заслуживает разработка компании, действующей под брендом Beamcomplex (ООО «Комплекс Луч») осуществляющая свою деятельность на территории Европы и многих стран (Beamcomplex.com.). Основным направлением деятельности которой является изготовление комплексов с ускорителями электронов для обработки пищевых продуктов ионизирующим излучением для увеличения срока их хранения на складах резервных фондов. В своих комплексах, в качестве источников использует ускорители электронов, произведенные Институтом ядерной физики имени Г.И. Будкера, г. Новосибирск.

Компания «Beamcomplex» работает по следующим направлениям:

- изготовление комплексов контейнерного типа с ускорителями электронов для их размещения на существующих складах длительного хранения продовольствия и обработки продукции ионизирующим излучением;
- проектирование и строительство продовольственных складов длительного хранения с комплексами контейнерного типа с ускорителями электронов для обработки продукции ионизирующим излучением;
- проектирование стерилизационных сооружений, строительство центров с комплексами для обработки пищевых продуктов рентгеновским излучением через стенки автомобильных холодильников.

Особенно интересна технология, предложенная при работе комплекса контейнерного типа с ускорителями электронов, предназначены для быстрого развертывания и ввода в эксплуатацию на объектах заказчиков.

На рисунке 7 представлена принципиальная схема работы модуля.

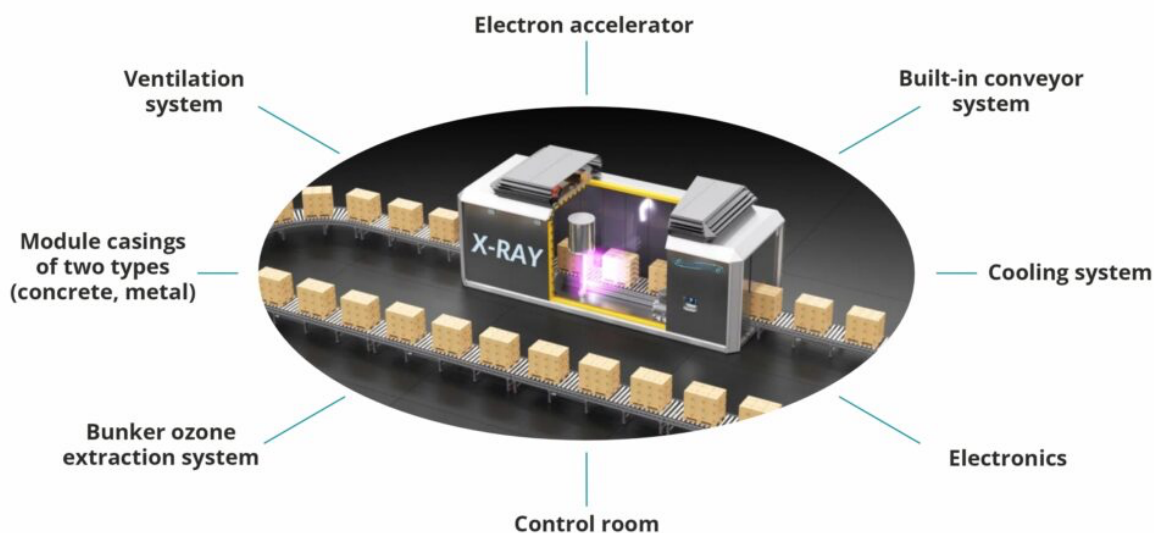


Рисунок 7. Схема работы модуля

На рисунке приведены аббревиатуры:

- модулей с кассетами двух типов (Module casings) (бетон, металл) – модулей, в которых размещаются продукты для обработки;
- системы вентиляции (Ventilation system) – обеспечивает циркуляцию воздуха внутри установки;
- системы встроенного конвейера (Built-in conveyor system) – перемещает модули с продуктами через зону обработки;
- электронного ускорителя (Electron accelerator) – генерирует поток электронов для радиационной обработки;
- системы охлаждения (Cooling system) – поддерживает оптимальную температуру внутри установки;
- системы извлечения озона из бункера (Bunker ozone extraction system) – удаляет озон, образующийся в процессе обработки;
- электронных компонентов (Electronics) – обеспечивают управление и контроль работы установки;
- контрольной комнаты (Control room) – места, откуда осуществляется управление процессом.

– Рентгеновское излучение (X-RAY) - используется для радиационной стерилизации продуктов.

Использование комплекса контейнерного типа (рис.8-10) для обработки электронно-лучевых и рентгеновских изделий сокращает сроки ввода объекта в эксплуатацию и снижает затраты по сравнению с затратами на строительство и монтаж отдельных систем. Комплекс представляет собой готовое фабричное изделие. В состав четырех модулей, собранных на заводе, входят:

- ускоритель электронов;
- конвейерные системы;
- система охлаждения ускорителя электронов;
- электронный блок ускорителя;
- системы извлечения озона, контроля радиационного фона, автоматического отключения ускорителя, пожаротушения и другие системы.

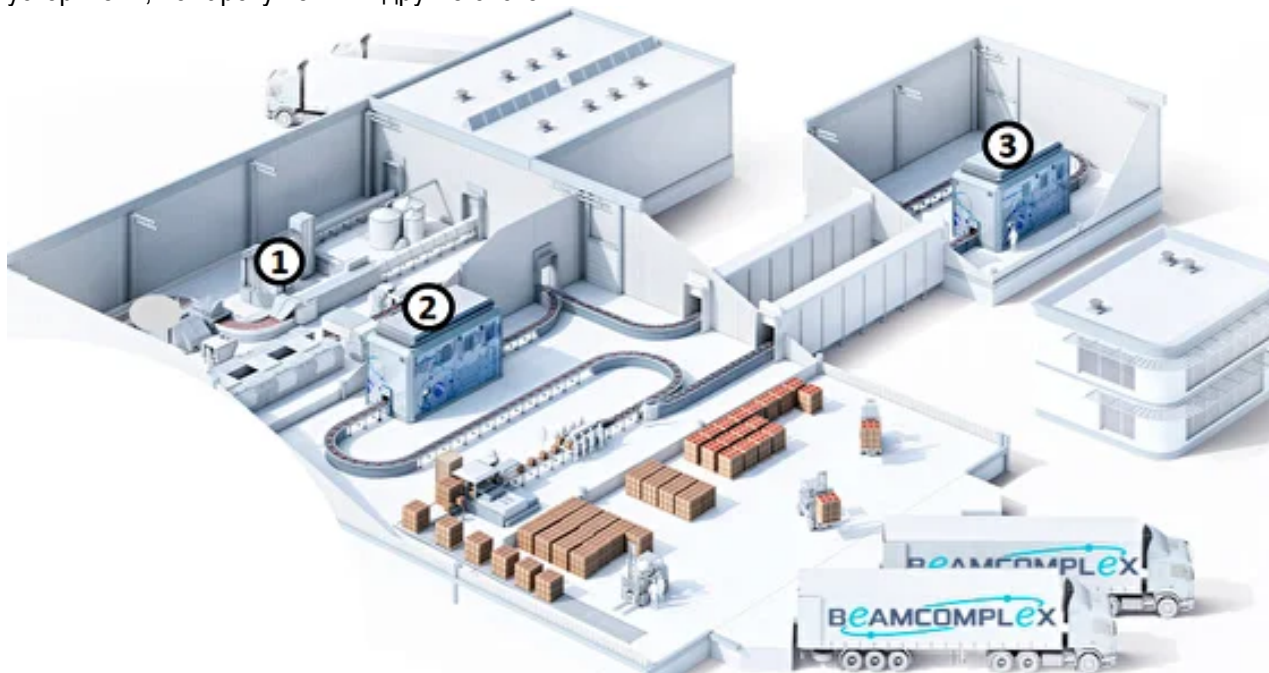


Рисунок 8. Схема комплекса контейнерного типа. Цифрами обозначены: 1 – источник ^{60}Co , 2 – ускоритель электронов в цехе 1; 3 – ускоритель электронов в цехе 2



Рисунок 9. Элемент комплекса контейнерного типа



Рисунок 10. Излучатель в комплексе контейнерного типа

Регулирование радиационной стерилизации продуктов питания направлено на обеспечение безопасности и безвредности продукции для потребителей. В России радиационная стерилизация регулируется государственными органами и действующими законами.

Основными документами, регламентирующими процесс, являются:

- Федеральный закон № 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения»: устанавливает общие требования к радиационной стерилизации и дозам облучения.
- Постановление Главного санитарного врача РФ № 32 от 28 ноября 2001 г.: содержит подробные рекомендации по организации радиационной стерилизации.
- ГОСТ Р 51740-2001 «Продукты пищевые. Информация для потребителя. Общие требования»: требует обязательной маркировки облученных продуктов питания.
- СНиП 2.04.03-85 «Канализация. Наружные сети и сооружения»: определяет нормы утилизации жидких отходов и сброса стоков, содержащих радиоактивные элементы.
- ГОСТ 33339-2015 – межгосударственный стандарт «Радиационная обработка пищевых продуктов. Основные технические требования». Устанавливает требования к обработке гамма-излучением, рентгеновским излучением или ускоренными электронами с целью снижения содержания патогенных микроорганизмов, снижения микробной нагрузки и зараженности насекомыми, подавления прорастания корнеплодов и увеличения срока годности скоропортящихся продуктов.
- ГОСТ 8.664-2019 – межгосударственный стандарт «Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Пищевые продукты. Радиационная обработка пищевых продуктов. Требования к дозиметрическому обеспечению». Содержит требования к дозиметрическому обеспечению всех стадий процесса облучения.
- ТР ТС 021/2011 («О безопасности пищевой продукции»): Аналогичен российскому стандарту, устанавливает требования к информационной маркировке продуктов, прошедших радиационную обработку, а также ограничения по дозам облучения и параметрам безопасности.

Единые санитарно-эпидемиологические и гигиенические требования к товарам, подлежащим санитарно-эпидемиологическому надзору (ЕСЭГР): включают раздел, регулирующий радиационную обработку продуктов питания. Устанавливается максимальная общая доза облучения для отдельных групп продуктов (например, для сухой мучной продукции и зерновых – до 10 кГр).

В соответствии с действующими стандартами РФ и ЕАЭС, производители и импортеры обязаны указывать следующую информацию на этикетке продуктов из муки и зерна, прошедших радиационную обработку:

- Наименование метода обработки: обязательно указывается термин «облученное» или «радиационно-обработанное».
- Размер дозы: часто указывается номинальная доза облучения, выраженная в килотреях (кГр).
- Дополнительная информация: может включать пояснения о назначении обработки и мерах предосторожности при обращении с продукцией.

При ввозе и обороте облученных продуктов из муки и зерна необходимо иметь сертификаты соответствия и декларации, подтверждающие соблюдение всех требований безопасности и дозирования.

Действующими стандартами и регламентами определены следующие нормы дозирования ионизирующего облучения для продуктов из муки и зерна:

- Для зерновых культур и семян дозировка обычно варьируется от 0,1 до 10 кГр, в зависимости от назначения и вида продукции.

- Мука и другие продукты переработки зерна могут проходить обработку дозой до 10 кГр.

Свежий хлеб, произведенный из облученной муки, подлежит дополнительному контролю, чтобы убедиться, что радиационная нагрузка не превышает допустимые нормы. Максимальная доза облучения должна соответствовать заявленным стандартам безопасности и здоровья человека.

Заключение

Исследовательская работа, посвященная комплексному изучению потенциала и возможных путей развития метода радиационной стерилизации хлебобулочной продукции, позволила сформулировать ряд важных выводов:

1. Высокая эффективность процесса радиационной стерилизации. Лабораторные эксперименты и анализ практики производственных испытаний убедительно продемонстрировали высокий потенциал данного метода. Радиационное воздействие эффективно устраняет вредные микроорганизмы, обеспечивая надежную защиту от порчи хлеба и иных мучных изделий. Это открывает широкие перспективы для массового внедрения технологии в отрасли хлебопечения.

2. Точная оптимизация уровня дозирования излучающего агента. Исследование установило оптимальный диапазон дозировок ионизирующего излучения, способствующий полному устранению патогенной микрофлоры без существенного ухудшения химического состава, физических свойств, вкуса и аромата готовой продукции. Такой подход гарантирует максимальную безопасность продукта при сохранении его потребительских качеств.

3. Отсутствие заметного отрицательного эффекта на характеристики изделия. Научные данные подтверждают, что радиационная обработка непосредственно хлеба, в отличие от муки и зерна, практически не влияет на физико-химическое состояние и внешние признаки готовых хлебобулочных изделий. Структура мякиша остается неизменной, сохраняются цвет, аромат и вкус готового продукта, сохраняя его привлекательность и пользу для потребителей.

4. Создание необходимой нормативно-технической базы. В рамках данной исследовательской деятельности был проанализирован полный комплект нормативных документов и методик, необходимых для корректного введения технологии радиационной стерилизации в условиях промышленного производства. Эта мера существенно упрощает внедрение новых подходов в повседневную работу предприятия.

5. Готовность производственных мощностей отечественных компаний. Комплексный анализ ситуации показал наличие возможностей для достаточного технического оснащения и готовности производственного персонала к активному применению современных методов радиационного обеззараживания хлебобулочной продукции. Массовое использование такой методики позволит значительно повысить конкурентоспособность отечественного производителя и расширить спектр применения за счет доставки в труднодоступные районы и снабжение нужд специализированных заказчиков.

6. Дальнейшие направления научных исследований. Настоящая работа обозначила ключевые научные проблемы и дальнейшие пути совершенствования технологии радиационной стерилизации, включая детальное изучение механизма воздействия ионизирующей радиации на долгохранящуюся продукцию. Эти знания помогут еще больше улучшить методы защиты и хранения продуктов питания.

Проведенное научное исследование позволяет значительно расширить сферу прикладных интересов при разработке радиационных способов стерилизации хлебобулочных изделий, предлагая важные решения для улучшения качества, увеличения сроков годности и обеспечения безопасности потребляемой пищи.

Список литературы

1. Ершов В.Г. Радиационные технологии: возможности, состояние и перспективы применения // Вестник Российской академии наук. 2013. Т. 83. № 5. С. 417-423.
2. Павлов А.Н. Исследование радиобиологических показателей эффективности экспериментального производственного процесса. М.: ВНИИПО, 2016. 28 с.
3. Пискаева А.И., Сидорин Ю.Ю., Дышлюк Л.С., Жумаев Ю.В., Просеков А.Ю. Исследование влияния кластеров серебра на антимикробные свойства облученных мясных продуктов // Пищевые продукты и сырье. 2014. Том 2. № 2. С. 98-103.

4. Санжарова Н.И., Гераскин С.А., Исамов Н.Н., Козьмин Г.В., Лой Н.Н., Павлов А.Н., Пименов Е.П., Цыгвинцев П.Н. Научные основы применения радиационных технологий в сельском хозяйстве. Обнинск: ВНИИАР, 2013. 256 с.
5. Слабыня Г.Н. Технология консервирования хлеба с использованием ионизирующего излучения: дис. ... канд. техн. наук. СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2023. 156 с.
6. Тимакова Р.Т., Тихонов С.Л., Тихонова Н.В., Горлов И.Ф. Влияние различных доз обработки ионизирующим излучением на физико-химические и микробиологические характеристики хлеба // Пищевые продукты и сырье. 2017. Том 5. № 2. с. 177-183.
7. Acharya N.G. Food irradiation and development of an alternative method // Food science and technology. 2004. Vol. 37. № 4. pp. 349-356.
8. Arvanitoyannis I.S. Irradiation of food commodities: techniques, applications, detection, legislation, safety and consumer opinion. L.: Academic Press, 2010. 850 p.
9. Chizh T.V., Kozmin G.V., Polyakova L.P., Melnikova T.V. Radiation processing as a technological technique for extending the shelf life of bakery products // Bakery and confectionery industry. 2011. № 3. pp. 28-31.
10. Concept of the strategic research program of the technological platform «Radiation technologies». M.: Ministry of Education and Science of the Russian Federation, 2012. 42 p.
11. Farkas J. Food irradiation // Encyclopedia of food sciences and nutrition. 2004. pp. 2479-2487.
12. Feliciano C.P. High-dose irradiated food: Current progress, applications, and prospects // Food control. 2018. Vol. 85. pp. 398-407.
13. Food irradiation research and technology. Eds. C.H. Sommers, X. Fan. Ames: Blackwell Publishing, 2006. 545 p.
14. Gaynutdinov T.R. Experimental selection of doses of ionizing radiation for preservation of food products // Radiation physics and chemistry. 2020. Vol. 177. pp. 102-109.
15. Ic E., Cetinkaya N. Food safety and irradiation related sanitary and phytosanitary approaches – Chinese perspective // Food control. 2020. Vol. 110. pp. 7-107.
16. Ihsanullah I., Rashid A. Current activities in food irradiation technology and radiation processing in Pakistan // Radiation physics and chemistry. 2017. Vol. 140. pp. 418-423.
17. Indarto R., Pratama A.W., Sari T.I., Theodora H.C. Food irradiation technology: A review of the uses and their capabilities // Journal of physics: conference series. 2020. Vol. 1569. № 4. pp. 9-42.
18. Ito V.C., Zielinski A.A.F., Demiate I.M., Spoto M., Nogueira A., Lacerda L.G. Gamma radiation effects on physicochemical, microbiological and antioxidant properties of wheat flour // LWT-food science and technology. 2019. Vol. 100. pp. 460-467.
19. Kava R. Irradiated foods // Nutrition today. 2003. Vol. 38. № 3. pp. 106-110.
20. Kodex Alimentarius. Irradiated food products. Geneva: FAO/WHO, 2007. 15 p.
21. Kume T., Furuta M., Todoriki S., Uenoyama N., Kobayashi Y. Status of food irradiation in the world // Radiation physics and chemistry. 2009. Vol. 78. № 3. pp. 222-226.
22. Munir M.T., Federighi M. Control of foodborne biological hazards by ionizing radiations // Journal of food protection. 2018. Vol. 81. № 5. pp. 847-856.
23. Pankaj S.K., Shi H., Keener K.M. A review of novel physical and chemical decontamination technologies for aflatoxin mitigation in maize // Toxins. 2018. Vol. 10. № 5. P. 211.
24. Paul A., Radhakrishnan M., Anandakumar S., Shanmugasundaram S., Anandharamakrishnan C. Disinfestation techniques for major cereals: A status report // Journal of stored products research. 2020. Vol. 89. P. 101673.
25. Schmidt M., Zannini E., Arendt E.K. Recent advances in physical post-harvest treatments for improved fungal control during grain storage // Trends in food science & Technology. 2018. Vol. 72. pp. 154-165.
26. Sommers C.H., Fan X. Food irradiation research and technology. 2nd ed. Ames: Blackwell Publishing, 2006. 545 p.

27. Sultan N., Wani I.A., Masoodi F.A. Moisture mediated effects of γ -irradiation on physicochemical and sensory characteristics of quinoa flour // *Radiation Physics and Chemistry*. 2018. Vol. 151. pp. 89-96.
28. Thayer D.W., Boyd G., Fett W.F. Synergy between irradiation and chlorination to reduce pathogens on fresh produce // *Journal of food protection*. 2006. Vol. 69. № 2. pp. 431-437.
29. Varalakshmi S. A review on the application and safety of non-thermal techniques on fresh produce and their products // *Journal of food processing and preservation*. 2021. Vol. 45. № 2. P. e15170.
30. Wijeratnam R.S.W., Sivakumar D., Ratnaweera A. Effect of gamma irradiation on microorganisms, chemical and sensory characteristics of dried fish // *Journal of the science of food and agriculture*. 2000. Vol. 80. № 14. pp. 2193-2198.

Investigation of the possibilities of radiation sterilization of bakery products at the A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center in the context of the production of mass and functional types of bread in cooperation with the Russian University of Biotechnology

Oleg M. Omelchenko

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Director
Center for Commercialization and Technology Transfer, Russian University of Biotechnology
Moscow, Russia
Omelchenko_OM@roshleb.com
ORCID 0000-0000-0000-0000

Alexander V. Belousov

Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Head of the Laboratory, State Scientific Center of the Russian Federation – A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center of the Federal Medical and Biological Agency of Russia
Moscow, Russia
Belousov_AV@fmbamail.ru
ORCID 0000-0000-0000-0000

Received 02.10.2025
Accepted 13.11.2025
Published 30.12.2025

UDC 67.71
EDN ETMHNH
VAK 4.3.5. Biotechnology of food and biologically active substances (technical sciences)
OECD 02.11.JY. FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY

Abstract

The study is aimed at a comprehensive exploration of the possibilities and prospects for radiation sterilization of bakery products, covering all major levels of research work from fundamental laboratory tests to designing industrial production lines for stable radiated bakery items. Throughout the investigation, detailed consideration is given to the stages of implementing the proposed technology, highlighting key scientific directions and practical measures. These include selecting an optimal level of ionizing radiation dosage, determining the degree of resistance of finished products to this type of irradiation, and developing corresponding regulatory and methodological documentation. The paper presents the results of an in-depth analysis of the impact of ionizing radiation on food quality conducted through a thorough review of modern practices of radiation exposure traditionally referred to as «radiation sterilization». It describes the preparation steps for experimental samples and control over their quality characteristics after irradiation. A separate section

investigates the current state of manufacturing infrastructure at domestic enterprises within the baking industry intended for large-scale implementation of technologies for radiation decontamination of bakery goods. The experiments verify the optimal dose level of ionizing radiation that ensures reliable destruction of pathogenic microorganisms with minimal stress on chemical, physical, taste, and sensory parameters of final products while maintaining their structure and strength. Intermediate data from experiments are analyzed and compared with findings from previous studies confirming high efficiency of ionizing treatment methods and opening new opportunities for further improvement of technological process conditions allowing significant increase in output volumes of high-quality products subjected to radiation processing. In preparing the publication, authors emphasize the importance of cooperation between sanitary epidemiological services and bakery producers proposing specific measures for creating unified standards and algorithms for carrying out radiation treatment of foodstuffs which will create favorable prerequisites for widespread adoption of innovative approaches by leading domestic manufacturers and small businesses in the sector. Thus, this work serves as an important source of knowledge consolidating recent advances in science and technology related to radiation sterilization of bakery products identifying trends towards further research and applied activities focused on deepening understanding of mechanisms underlying the effects of ionizing radiation on long-term stored food commodities.

Keywords

radiation sterilization, potential consequences of sterilizing effects, technological process of ionizing irradiation, methods of radiation treatment, hygiene standards of food industry.

References

1. Yershov V.G. Radiation technologies: possibilities, status and prospects of application // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2013. Vol. 83. № 5. pp. 417-423.
2. Pavlov A.N. Investigation of radiobiological indicators of the effectiveness of the experimental production process. M.: VNIPO, 2016. 28 p.
3. Piskaeva A.I., Sidorin Yu.Y., Dyshlyuk L.S., Zhumaev Yu.V., Prosekov A.Yu. Investigation of the effect of silver clusters on the antimicrobial properties of irradiated meat products. 2014. Vol. 2. № 2. pp. 98-103.
4. Sanzharova N.I., Geraskin S.A., Isamov N.N., Kozmin G.V., Loy N.N., Pavlov A.N., Pimenov E.P., Tsygvintsev P.N. Scientific bases of application of radiation technologies in agriculture. Obninsk: VNIAR, 2013. 256 p.
5. Slabynya G.N. Technology of bread canning using ionizing radiation: dis. ... cand. of tech. scien. SPb.: St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 2023. 156 p.
6. Timakova R.T., Tikhonov S.L., Tikhonova N.V., Gorlov I.F. The effect of various doses of ionizing radiation treatment on the physico-chemical and microbiological characteristics of bread // Food products and raw materials. 2017. Vol. 5. № 2. pp. 177-183.
8. Arvanitoyannis I.S. Irradiation of food commodities: techniques, applications, detection, legislation, safety and consumer opinion. L.: Academic Press, 2010. 850 p.
9. Chizh T.V., Kozmin G.V., Polyakova L.P., Melnikova T.V. Radiation processing as a technological technique for extending the shelf life of bakery products // Bakery and confectionery industry. 2011. № 3. pp. 28-31.
10. Concept of the strategic research program of the technological platform «Radiation technologies». M.: Ministry of Education and Science of the Russian Federation, 2012. 42 p.
11. Farkas J. Food irradiation // Encyclopedia of food sciences and nutrition. 2004. pp. 2479-2487.
12. Feliciano C.P. High-dose irradiated food: Current progress, applications, and prospects // Food control. 2018. Vol. 85. pp. 398-407.
13. Food irradiation research and technology. Eds. C.H. Sommers, X. Fan. Ames: Blackwell Publishing, 2006. 545 p.
14. Gaynutdinov T.R. Experimental selection of doses of ionizing radiation for preservation of food products // Radiation physics and chemistry. 2020. Vol. 177. pp. 102-109.

15. Ic E., Cetinkaya N. Food safety and irradiation related sanitary and phytosanitary approaches – Chinese perspective // *Food control*. 2020. Vol. 110. pp. 7-107.
16. Ihsanullah I., Rashid A. Current activities in food irradiation technology and radiation processing in Pakistan // *Radiation physics and chemistry*. 2017. Vol. 140. pp. 418-423.
17. Indiarto R., Pratama A.W., Sari T.I., Theodora H.C. Food irradiation technology: A review of the uses and their capabilities // *Journal of physics: conference series*. 2020. Vol. 1569. № 4. pp. 9-42.
18. Ito V.C., Zielinski A.A.F., Demiate I.M., Spoto M., Nogueira A., Lacerda L.G. Gamma radiation effects on physicochemical, microbiological and antioxidant properties of wheat flour // *LWT-food science and technology*. 2019. Vol. 100. pp. 460-467.
19. Kava R. Irradiated foods // *Nutrition today*. 2003. Vol. 38. № 3. pp. 106-110.
20. Kodex Alimentarius. Irradiated food products. Geneva: FAO/WHO, 2007. 15 p.
21. Kume T., Furuta M., Todoriki S., Uenoyama N., Kobayashi Y. Status of food irradiation in the world // *Radiation physics and chemistry*. 2009. Vol. 78. № 3. pp. 222-226.
22. Munir M.T., Federighi M. Control of foodborne biological hazards by ionizing radiations // *Journal of food protection*. 2018. Vol. 81. № 5. pp. 847-856.
23. Pankaj S.K., Shi H., Keener K.M. A review of novel physical and chemical decontamination technologies for aflatoxin mitigation in maize // *Toxins*. 2018. Vol. 10. № 5. P. 211.
24. Paul A., Radhakrishnan M., Anandakumar S., Shanmugasundaram S., Anandharamakrishnan C. Disinfestation techniques for major cereals: A status report // *Journal of stored products research*. 2020. Vol. 89. P. 101673.
25. Schmidt M., Zannini E., Arendt E.K. Recent advances in physical post-harvest treatments for improved fungal control during grain storage // *Trends in food science & Technology*. 2018. Vol. 72. pp. 154-165.
26. Sommers C.H., Fan X. Food irradiation research and technology. 2nd ed. Ames: Blackwell Publishing, 2006. 545 p.
27. Sultan N., Wani I.A., Masoodi F.A. Moisture mediated effects of γ -irradiation on physicochemical and sensory characteristics of quinoa flour // *Radiation Physics and Chemistry*. 2018. Vol. 151. pp. 89-96.
28. Thayer D.W., Boyd G., Fett W.F. Synergy between irradiation and chlorination to reduce pathogens on fresh produce // *Journal of food protection*. 2006. Vol. 69. № 2. pp. 431-437.
29. Varalakshmi S. A review on the application and safety of non-thermal techniques on fresh produce and their products // *Journal of food processing and preservation*. 2021. Vol. 45. № 2. Art. e15170.
30. Wijeratnam R.S.W., Sivakumar D., Ratnaweera A. Effect of gamma irradiation on microorganisms, chemical and sensory characteristics of dried fish // *Journal of the science of food and agriculture*. 2000. Vol. 80. № 14. pp. 2193-2198.

Печатное издание «Хлебопечение России»
Том 69 (2025). № 3-4

ISSN 2073-3569

Реестровая запись о регистрации 014330 от 10.01.1996г.
Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и
массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Издание включено в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК и Российский
индекс научного цитирования.

Рукописи подвергаются редакционной обработке. Точки зрения авторов и редакционной коллегии могут
не совпадать. Авторы публикуемых материалов несут ответственность за их научную достоверность.

Адрес редакции: 109028, г. Москва, а/я 50, Российский Союз пекарей
е-mail: xele-b-vak@mail.ru, <https://hbreview.ru>

Подписано к размещению 30.12.2025.
Отпечатано в типографии ООО «Российский союз пекарей», 109028, г. Москва, а/я 50.
Подписано в печать 30.12.2025. Тираж 300 экз. Формат А4. Свободная цена.

© Учредитель ООО «Российский союз пекарей», 2025

Printed edition «Bakery of Russia»
Volume 69 (2025). Issue 3-4

ISSN 2073-3569

Registry record of registration 014330 dated 10.01.1996r.
Registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass
Communications (Roskomnadzor).

The edition is included into The List of The Reviewed Scientific Publications recommended by The Highest
Certifying Commission and The Russian Index of Scientific Citing.

Manuscripts are exposed to editorial processing. The points of view of authors and an editorial board can not
coincide. Authors of the published materials bear responsibility for their scientific reliability.

Address of the editorial office: 109028, Moscow, a/ya 50, Russian Union of Bakers
е-mail: xele-b-vak@mail.ru, <https://hbreview.ru>

Signed for placement on 30.12.2025.
Printed at the printing house of the NGO «Russian Bakers Union», 109028, Moscow, P.O. Box 50.
Signed for printing on 30.12.2025. Print run of 300 copies. A4 format. Free price.

© Founder NGO «Russian Bakers Union», 2025