

Информационная система оптимального управления процессом выпечки хлебобулочных изделий

Российский биотехнологический университет, г. Москва, Российская Федерация

В.О. Новицкий, М.А. Зиновьева

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:
Владимир Олегович Новицкий
E-mail: nvo60@mgupp.ru

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:
Новицкий, В.О., & Зиновьева, М.А. (2025). Информационная система оптимального управления процессом выпечки хлебобулочных изделий. Хранение и переработка сельхозсырья, 33(3), 165-186. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.3.654>

ПОСТУПИЛА: 23.04.2025

ПРИНЯТА: 15.09.2025

ОПУБЛИКОВАНА: 30.09.2025

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:
авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.



АННОТАЦИЯ

Введение: Универсальные MES-системы (Manufacturing Execution System – система управления производственными процессами) не адаптированы под хлебопекарное производство: не обеспечивают гибкую настройку параметров выпечки, не учитывают влияние технологических режимов на качественные характеристики продукции. Интеграция такой системы занимает много времени и требует тщательной настройки или доработки, что подчеркивает необходимость в прикладных решениях с учетом отраслевой специфики.

Цель: Разработать и апробировать систему оптимального управления (ИСОУ) процессом выпечки хлебобулочных изделий при соблюдении заданных стандартов.

Методы: В рамках исследования разработана ИСОУ процессом выпечки хлебобулочных изделий. В основу легла математическая модель оптимизации, построенная с применением корреляционно-регрессионного анализа и метода градиентного спуска. Эмпирическая база состоит из данных, полученных методом экспертного опроса технологов и параметров технологических карт. Апробация проводилась в эмуляционной среде модели.

Результаты: Представлена информационная система оптимального управления процессом выпечки хлебобулочных изделий, реализованная в виде программного модуля с возможностью интеграции в MES-среду. Научная новизна работы заключается в математической постановке задачи оптимизации и разработке математической модели управления процессом выпечки, на основе которой задача решается. В отличие от существующих исследований, сосредоточенных на планировании загрузки линий или оценке качества без интеграции в контуры автоматизированного управления, разработанная модель обеспечивает оптимизацию рецептуры и режимов выпечки в едином контуре управления. Апробация в эмуляционной среде показала снижение средних отклонений по качеству на 15 % и сокращение затрат на сырье до 7 % (R^2 от 0,48 до 0,79; MSE от 0,0009 до 7,89 для регрессионных моделей).

Выводы: Разработанная система может быть интегрирована в MES-систему как специализированный модуль оптимального управления процессом выпечки. Представленный подход формализует процессы управления и оптимизации в хлебопекарном производстве и может быть масштабирован для других производств пищевой промышленности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

информационная система управления; управление качеством хлебобулочных изделий; факторный анализ MES-систем; управление процессом выпечки, корреляционно-регрессионный анализ; задача оптимизации, программное обеспечение; экономическая эффективность

Information System for Optimal Control of the Baking Process for Bakery Products

Russian Biotechnological University,
Moscow, Russian Federation

Vladimir O. Novitsky, Maria A. Zinovieva

CORRESPONDENCE:

Vladimir O. Novitsky

E-mail: nvo60@mgupp.ru

FOR CITATIONS:

Novitsky, V.O., & Zinovieva, M.A.
Information system for optimal control
of the baking process of bakery products.
Storage and Processing of Farm
Products, 33(3), 165-186.
[https://doi.org/10.36107/
spfp.2025.3.654](https://doi.org/10.36107/spfp.2025.3.654)

RECEIVED: 23.04.2025

ACCEPTED: 15.09.2025

PUBLISHED: 30.09.2025

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



ABSTRACT

Introduction: Universal MES (Manufacturing Execution System) solutions are not adapted to bakery production: they do not provide flexible configuration of baking parameters and do not account for the influence of process conditions on product quality characteristics. Integrating such a system is time-consuming and requires careful configuration or further customization, which highlights the need for applied solutions that reflect industry-specific requirements.

Purpose: To develop and pilot-test an information system for optimal control (ISOC) of the baking process for bakery products while complying with specified standards.

Method: Within the study, an ISOC for the baking process of bakery products was developed. The system is based on a mathematical optimization model built using correlation–regression analysis and the gradient descent method. The empirical basis comprises data obtained through an expert survey of process engineers and parameters from process specification sheets. Pilot testing was conducted in a model-based emulation environment.

Results: An information system for optimal control of the baking process for bakery products is presented, implemented as a software module with the option of integration into an MES environment. The scientific novelty of the study lies in the mathematical formulation of the optimization problem and the development of a mathematical model for controlling the baking process, on which the solution is based. Unlike existing studies that focus on production line scheduling or quality assessment without integration into automated control loops, the proposed model enables optimization of both formulation and baking regimes within a unified control loop. Testing in an emulation environment demonstrated a 15% reduction in mean quality deviations and up to a 7% reduction in raw material costs (R^2 from 0.48 to 0.79; MSE from 0.0009 to 7.89 for the regression models).

Conclusion: The developed system can be integrated into an MES system as a specialized module for optimal control of the baking process. The proposed approach formalizes control and optimization processes in bakery production and can be scaled to other segments of the food industry.

KEYWORDS

manufacturing execution system (MES); information system; bakery product quality management; factor analysis of MES systems; baking process control; correlation–regression analysis; optimization problem; software; economic efficiency

ВВЕДЕНИЕ

Качество хлебобулочных изделий в значительной мере зависит от свойств используемой муки. Для предприятий хлебопекарной отрасли именно стабильность сырья определяет возможность поддерживать устойчивые технологические режимы выпечки. В странах Европейского союза проблема качества сырья решается за счет централизованной системы контроля зерна и высокой концентрации мукомольных предприятий. Исследования показали, что хемометрический анализ партий муки, проведенный на примере Румынии и Венгрии, выявил низкий коэффициент вариации по содержанию белка и влажности (<7%), что обеспечивает однородность сырья и позволяет пекарням работать в условиях стандартизированных технологических режимов (Šechura & Jaghdani, 2021; Timar et al., 2023).

В странах СНГ наблюдается иная ситуация. Зерно поступает из разных регионов с отличающимися агроклиматическими условиями (Юг России, Поволжье, Центральное Черноземье и Нечерноземье России, Сибирь и др.) и системами хранения, что приводит к значительным колебаниям качества внутри одного региона (Агапкин & Махотина, 2021). Мелешкина и соавт. (2019) показали на примере анализа муки с использованием миксолаба, что различия в клейковине и других показателях существенно влияют на свойства теста и конечный продукт. В результате пекарням необходимо не только контролировать входящее сырье, но и адаптировать параметры выпечки в режиме реального времени.

Для цифровизации хлебопекарного производства внедряются MES-системы (Manufacturing Execution System). Их функции ограничены мониторингом, диспетчеризацией и ведением рецептов (Зиновьева & Новицкий, 2025), что не позволяет автоматически корректировать технологические параметры и обеспечивать оптимизацию качества продукции. Таким образом, возникает необходимость в решениях, способных интегрировать управление качеством на уровне технологического процесса.

Зарубежные исследования предложили несколько подходов к решению задач управления. Эволюционные алгоритмы применялись для оптимизации загрузки линий и расписаний (Babor et al., 2023), методы Fuzzy ANP и Fuzzy TOPSIS позволяли фор-

мализовать экспертные оценки качества готовой продукции (Serpa et al., 2022), а RSM и DOE использовались для рецептурной оптимизации (El-Kholany et al., 2023). Авторы решают частные задачи и не обеспечивают комплексную интеграцию в MES с одновременным учетом качества сырья, параметров выпечки и себестоимости.

Для объединения технологических и экономических аспектов применялись цифровые двойники печей и энергоинтеллектуальные платформы (Melesse et al., 2024), которые позволяют снизить энергозатраты при сохранении качества продукции. Метаэвристические алгоритмы использовались для планирования массового производства (Rossit et al., 2024), а гибридные алгоритмы многокритериального планирования на базе Answer Set Programming позволяли учитывать ресурсные ограничения (El-Kholany et al., 2023). Несмотря на перспективность подходов, задачи автоматической оптимизации параметров выпечки и интеграции в MES остаются нерешенными.

В российских исследованиях основное внимание сосредоточено на задачах планирования и логистики. Так, Белова и соавт. (2020) предложили алгоритмы планирования загрузки производственных линий, что позволило повысить эффективность использования оборудования. Схожую цель преследует система контроля отгрузки, разработанная Шибаловой и Новицким (2021), которая учитывает складские остатки и тем самым снижает риски несвоевременных поставок. Новицкий и Мерцалов (2008), в свою очередь, исследовали вопросы формирования помольных смесей, обеспечивая стабильность качества сырья. Однако эти работы остаются в русле организационно-логистических задач и не затрагивают управление непосредственно технологическими режимами.

Исследования Абрамова (2020), Котанджяна и Биндзяр (2023), Ашмаровой и Федуловой (2016), а также Конева (2019) уже обращаются к проблеме автоматизации управления процессами выпечки. Тем не менее, даже в этих работах акцент сделан преимущественно на отдельных аспектах (например, поддержание температуры или учет себестоимости), что не формирует целостного подхода к оптимизации режимов выпечки. Таким образом, несмотря на наличие решений по планированию, логистике и частичным вопросам технологическо-

го контроля, задача интегрированного управления режимами выпечки с учетом как качества продукции, так и экономических показателей остается недостаточно разработанной, что и определяет актуальность настоящего исследования.

Современные исследования подтверждают востребованность комплексного подхода к управлению производственными процессами. Так, Wu et al. (2023) показали, что применение цифрового двойника открывает возможность оптимизации с учетом динамики энергопотребления, что позволяет одновременно снижать издержки и поддерживать качество продукции. В работе Fu et al. (2025) представлена методика динамической перенастройки производственных линий в условиях стохастических возмущений, что усиливает устойчивость производственных систем к неопределенности. Timar et al. (2023) обращают внимание на критическую зависимость эффективности адаптивных моделей управления от стабильности качества сырья, показывая, что даже высокотехнологичные подходы уязвимы при изменчивости исходного материала. Таким образом, совокупность этих направлений задает ориентир для разработки комплексных решений, объединяющих экономические и технологические критерии. Однако в перечисленных работах ключевой акцент смещен либо на энергетику и устойчивость оборудования, либо на отдельные аспекты сырьевой стабильности. Автоматизация режимов выпечки в хлебопекарной отрасли, учитывающая качество зерна, технологические параметры и себестоимость, остается нерешенной задачей. Настоящее исследование направлено на восполнение этого пробела за счет разработки и апробации системы оптимального управления процессом выпечки хлебобулочных изделий.

Цель данного исследования заключается в разработке и апробации системы оптимального управления процессом выпечки хлебобулочных изделий при соблюдении заданных стандартов. Гипотеза исследования: использование предлагаемой модели позволит снизить отклонения по целевым показателям качества не менее чем на 15 % и сократить затраты на сырье не менее чем на 5 % по сравнению с базовыми параметрами, что будет подтверждено расчетом статистически значимых метрик (R^2 , MSE) и сравнением с базовым технологическим режимом. Модель решает задачу многомерной (четыре варьируемых переменных) условной оп-

тимизации на вещественной области определения переменных, является нелинейной, так как целевая функция имеет нелинейный полиномиальный вид, а все ограничения линейны.

Исследовательские вопросы:

RQ1: Какие существующие MES-решения применимы в хлебопекарной отрасли и в какой мере они удовлетворяют задачам оптимизации технологических процессов?

RQ2: Каким образом можно построить математическую модель для оптимизации параметров управления выпечкой с учетом качественных характеристик продукции и себестоимости рецептуры?

RQ3: Каковы результаты верификации разработанной модели в эмуляционной среде по сравнению с исходными параметрами, и достигаются ли целевые показатели эффективности?

Хлебопекарная отрасль выбрана в качестве полигона для апробации математической модели по причине высокой чувствительности качества продукции к отклонениям технологических параметров (температуры, влажности, времени) и значительной вариативности качества исходного сырья, что создает естественную среду для тестирования адаптивных моделей оптимизации. Разработанная модель учитывает эти особенности, минимизирует отклонения от заданных показателей качества с учетом затрат на сырье и интегрируется в существующие MES-системы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Участники

В исследовании приняли участие более 20 экспертов с практическим опытом в области автоматизации пищевых производств и управления качеством на хлебопекарных предприятиях. В выборке представлены технологи, руководители цехов, инженеры по автоматизации, сотрудники лаборатории качества и планово-экономических служб. Производственный стаж экспертов варьировался от 5 до 15 лет, средний возраст составил 42 года. Опрос проводился на базе ЗАО БКК «Коломенский».

Материалы

В качестве эмпирической базы использовались производственные измерения, полученные с хлебопекарного участка. Источниками данных выступили журналы контроля качества, технологические карты, а также показания датчиков температуры, влажности и скорости транспортной ленты. Для оценки значимости критериев оценки MES использовалась анкета, включающая такие параметры, как масштабируемость, интеграция, аналитика, надежность, удобство интерфейса, функциональные возможности контроля качества, мониторинга, поддержки и стоимость.

Разрабатываемая информационная система оптимального управления проектировалась с расчетом на интеграцию в существующую MES-среду предприятия. Обмен данными между ИСОУ и MES реализован через API (Application Programming Interface), что обеспечивает совместимость с типовыми промышленными платформами. Результаты расчетов передаются в управляющий контур в полуавтоматическом режиме, с возможностью ручной корректировки оператором. Исследования теплофизических характеристик промышленных хлебопекарных печей показывают, что точное воспроизведение температурных профилей является ключевым фактором для интеграции оптимизационных моделей в MES-контур (Alonso et al., 2024).

Инструменты

Математическая модель оптимизации управления процессом выпечки реализована на языке JavaScript с использованием библиотеки Apache Commons Math. Расчет коэффициентов корреляции и регрессии выполнялся в Microsoft Excel. Данные экспертного опроса обрабатывались с помощью сводных таблиц и стандартных статистических функций.

Методы

Метод экспертных оценок применялся для сбора данных о значимости критериев качества и факторов, влияющих на производственный процесс. Такой подход приемлем при ограниченном объеме статистических наблюдений. Факторный анализ

использовался для снижения размерности данных и выделения ключевых факторов, влияющих на выбор MES и формирование технологических режимов. Статистическая значимость факторов проверялась по мере согласованности выборки. Корреляционно-регрессионный анализ позволил выявить зависимости между управляемыми параметрами процесса выпечки (время в каждом из трех секторов тоннельной печи, доля ржаной муки в рецептуре) и качественными характеристиками продукции.

Постановка задачи оптимизации

Оптимизация формулируется как задача минимизации отклонений фактических показателей качества от нормативных значений с учетом стоимости рецептуры. Выбор метода градиентного спуска обусловлен малым числом переменных ($n = 4$), гладкостью целевой функции и высокой скоростью сходимости для данной размерности задачи. Вычислительная сложность метода при числе переменных n и количестве итераций k составляет $O(kn)$.

Для рассматриваемой задачи оптимизации целевая функция является непрерывной и дифференцируемой (во всей области определения переменных), что обеспечивает стабильную работу метода градиентного спуска. Сходимость алгоритма достигается за счет корректного выбора шага обучения и использования функции с гладким рельефом, исключая резкие изменения направления градиента. При выбранных параметрах метод стабильно сходится к оптимуму за ≤ 50 итераций. Рассматривалась возможность применения адаптивных методов оптимизации, таких как Adam, RMSProp, а также стохастических модификаций градиентного спуска, которые могут быть полезны при оптимизации шумных функций. Однако для данной задачи, характеризующейся детерминированной гладкой целевой функцией, применение этих методов не дает значимых преимуществ по качеству решения, но увеличивает вычислительные затраты.

Несмотря на то, что в расчетах учитываются несколько качественных характеристик продукции, они агрегированы в одну целевую функцию через систему весовых коэффициентов. Задача формализована как условная многомерная оптимизация

(с одной целевой функцией), а не как многокритериальная оптимизация (выбор). Релевантность такого подхода подтверждена результатами предыдущих работ (Белова и соавт., 2020; Шибалова & Новицкий, 2021; Новицкий & Мерцалов, 2008).

Валидация модели

В рамках настоящего исследования использовались обучающий и тестовый наборы данных. Достоверность модели оценивалась с помощью статистической значимости коэффициентов регрессии ($p < 0,005$) и метрик качества аппроксимации (R^2 , RMSE, MSE), рассчитанных как по обучающему, так и по тестовому набору.

Отдельно анализировалась устойчивость найденного оптимума целевой функции. Под устойчивостью понимается степень изменения положения и значений оптимума при варьировании коэффициентов значимости, определенных по результатам нормированной экспертной оценки. Поскольку оптимизационная задача решается методом градиентного спуска на 4-мерной нелинейной поверхности, вид поверхности и величина градиентов зависят от весовых коэффициентов, задаваемых экспертами. Вероятность попадания оптимума на границы области определения при данном типе целевой функции крайне низка, поэтому влияние линейных ограничений на устойчивость незначимо. Таким образом, нормированная экспертиза обеспечивает предсказуемое поведение модели и снижает чувствительность результата к вариациям входных весов.

ПРОЦЕДУРА ИССЛЕДОВАНИЯ

Системный анализ хлебопекарного производства

Для успешной разработки ИСОУ в хлебобулочной промышленности необходимо провести системный анализ: определить пользователей системы, их функции и взаимосвязи. Эта процедура позволит понять, какие именно задачи решает система и как пользователи взаимодействуют с ней. Построение диаграммы вариантов использования (Use-Case) помогает визуализировать эти взаимодействия. На Рисунке 1 представлена Use-Case диаграмма (As Is — как есть), на которой отображены

основные пользователи системы, выполняемые ими функции и взаимосвязи. Система определяется как множество взаимосвязанных элементов для реализации главной цели (Новицкий, 2011).

Для успешного функционирования ИСОУ в хлебобулочном производстве необходимо понимание её предметной области. Элементы и их параметры обеспечивают эффективность системы. Каждая составляющая, от пользователей до оборудования, взаимодействует между собой, создавая единую экосистему, способствующую оптимизации процессов (Егушова & Позднякова, 2018; Прахов, 2015). Основными элементами системы являются: персонал, оборудование, сырье, интерфейсы для ввода данных и документация. Персонал — это целый ряд специалистов: бухгалтеры, начальники цехов, технологи, заведующая лабораторией, лаборанты, начальник экспедиции, сотрудники планового отдела, заведующие складами, логисты и коллектив разработчиков. Их компетенция, квалификация, опыт работы, внимательность и стрессоустойчивость играют ключевую роль в эффективности системы. Оборудование системы: хлебопекарные печи, тестораскаточные машины, мукопросеиватели, тестомесильные машины, тестоделители, расстоечные шкафы, хлеборезательные машины, ферментаторы и упаковочное оборудование. Важно учитывать такие характеристики оборудования, как мощность, производительность, температурные диапазоны, энергопотребление, сложность эксплуатации и частота технического обслуживания. Сырье и его свойства (условия хранения, срок годности и стоимость) также являются важным элементом системы. Интерфейсы обеспечивают ввод данных, автоматическое заполнение и интеграцию с другими модулями, такими как бухгалтерия, склад, лаборатории и производство.

Разработка математической модели

Выбор управляемых переменных (Таблица 1) основан на их значимом воздействии на процесс выпечки и качество конечного продукта. Обоснованность выбора указанных переменных подтверждается данными ряда исследований, согласно которым наилучшие результаты достигаются при применении трехфазной технологии выпечки. Каждая из стадий — увлажнение, обжарка и допекание — требует строго определенных параметров, оказы-

Рисунок 1

Use-case diagram системы управления хлебопекарным производством (As Is)

Figure 1

Use-case Diagram of the Bakery Production Management System ("As Is")

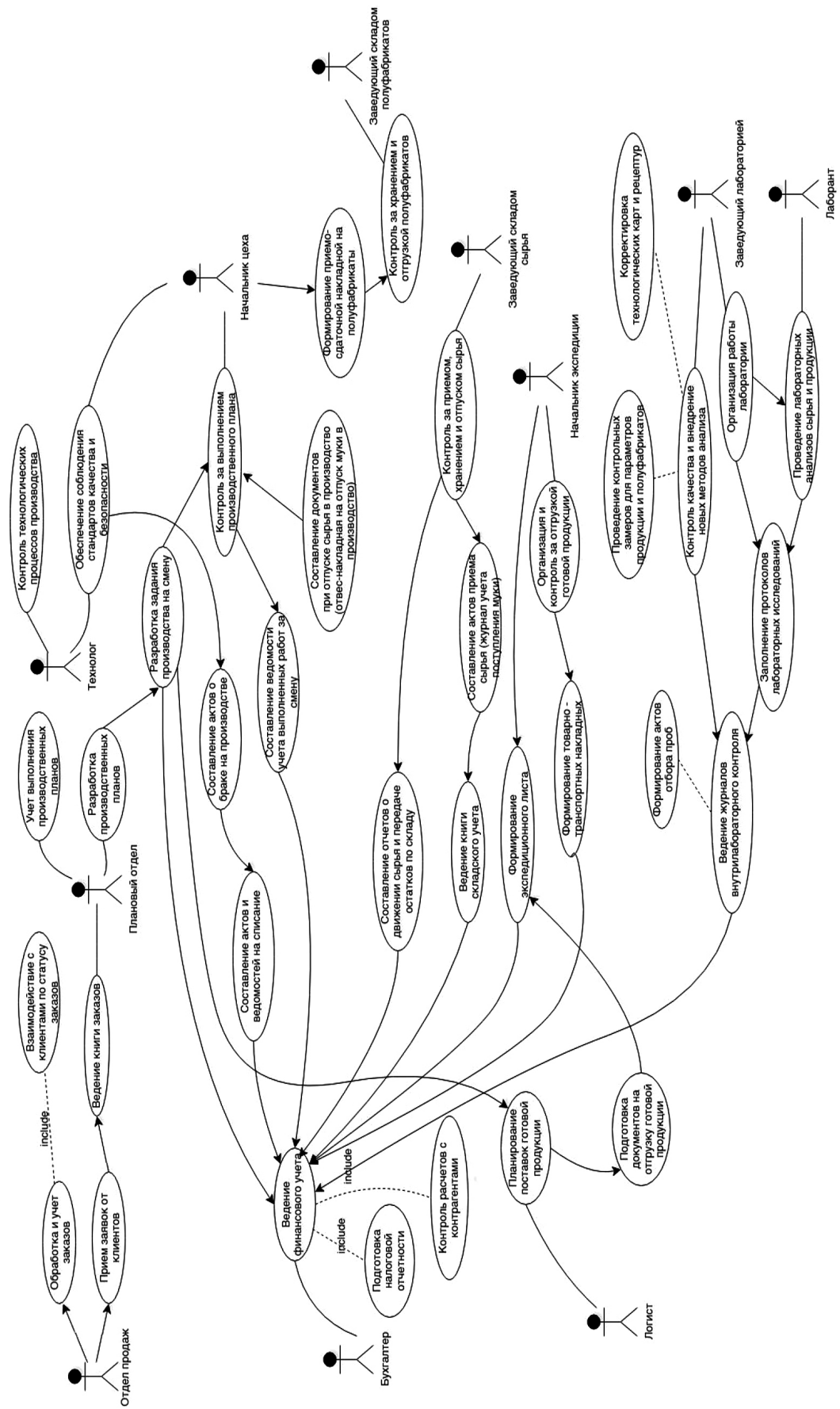


Таблица 1

Обозначения переменных и коэффициентов, используемых в модели

Table 1

Designations of Variables and Coefficients Used in the Model

Обозначение	Описание
Переменные	
$C_{рж}$	Доля ржаной муки в смеси,%. Определяет текстуру, аромат и питательные свойства хлебобулочных изделий, оказывая влияние на вкусовые характеристики
$t_{увл}$	Продолжительность увлажнения, мин
$t_{обж}$	Продолжительность обжарки, мин
$t_{доп}$	Продолжительность допекания, мин. $t_{увл}$, $t_{обж}$, $t_{доп}$ влияют на внешний вид, цвет и структуру корки, а также на общее качество и сохранность продукта
Коэффициенты	
$C_{пш}$	Доля пшеничной муки в смеси,%
$t_{вып}$	Продолжительность выпечки (общая), мин
$Y_{i_{цел}}$	Целевые значения качественных характеристик хлебобулочных изделий
$Y_i(C_{рж}, t_{увл}, t_{обж}, t_{доп})$	Фактические значения качественных характеристик хлебобулочных изделий
w_i	Коэффициент важности i -й качественной характеристики
$i = 1...n$	Счетчик i -й качественной характеристики, где 1 – Глянец, усл.ед. Указывает на правильность температурного режима и равномерность выпечки; 2 – Способность сохранять форму, усл. ед. Отражает технологическую устойчивость, влияет на транспортировку и внешний вид; 3 – Удельный объем, см ³ /г; 4 – Пористость,%. Удельный объем и пористость характеризуют текстуру и «воздушность» изделия; 5 – Общая деформация, ед. прибора. Описывает прочность мякиша; 6 – Упёк,%. Характеризует изменение массы изделия после выпечки
$m_{рж}$	масса ржаной муки, кг
$C_{рж}$	стоимость ржаной муки за кг, р.
$m_{пш}$	масса пшеничной муки, кг
$C_{пш}$	стоимость пшеничной муки за кг, р.
$m_з$	масса закваски, кг
$C_з$	стоимость закваски за кг, р
m_c	масса соли, кг
C_c	стоимость соли за кг, р.
m_d	масса дрожжей, кг
C_d	стоимость дрожжей за кг,р.
C_{max}	предельная стоимость рецептуры, р.

вающих решающее влияние на формирование структуры и вкуса изделия. Включение этих параметров в расчетную модель делает возможным более точное управление процессом, что способствует достижению стабильного качества продукции и соответствия установленным требованиям.

Математическая модель задачи оптимизации выглядит следующим образом:

$$Q(C_{рж}, t_{увл}, t_{обж}, t_{доп}) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \left(\frac{Y_{i_{цел}} - Y_i(C_{рж}, t_{увл}, t_{обж}, t_{доп})}{Y_{i_{цел}}} \right)^2 \rightarrow \min_{C_{рж}, t_{увл}, t_{обж}, t_{доп}} Q, \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 1 \leq t_{\text{увл}} \leq 4, \text{ мин,} \\ 1 \leq t_{\text{обж}} \leq 6, \text{ мин,} \\ 15 \leq t_{\text{доп}} \leq 60, \text{ мин,} \\ t_{\text{вып}} = t_{\text{увл}} + t_{\text{обж}} + t_{\text{доп}}, \\ 40 \leq t_{\text{вып}} \leq 100, \text{ мин,} \\ 40\% \leq C_{\text{рж}} \leq 80\%, \\ m_{\text{рж}} + m_{\text{пш}} + m_{\text{з}} + m_{\text{с}} + m_{\text{д}} = 100 \text{ кг,} \\ m_{\text{рж}} \cdot c_{\text{рж}} + m_{\text{пш}} \cdot c_{\text{пш}} + m_{\text{з}} \cdot c_{\text{з}} + m_{\text{с}} \cdot c_{\text{с}} + m_{\text{д}} \cdot c_{\text{д}} \leq C_{\text{max}}. \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (2) \\ (3) \\ (4) \\ (5) \\ (6) \\ (7) \\ (8) \end{array}$$

Целевая функция (1) минимизирует сумму квадратов разностей между целевыми и фактическими значениями характеристик хлебобулочных изделий, умноженных на соответствующий весовой коэффициент. Такой подход позволяет стабилизировать качество выпекаемых хлебобулочных изделий.

Ограничения, определенные формулами (2)–(9), обеспечивают экономическую и практическую целесообразность производства хлебобулочных изделий, учитывая затраты на основные ингредиенты и компоненты процесса.

Формулы (2)–(6) регулируют временные интервалы увлажнения, обжарки и допекания, обеспечивая оптимальные текстуру и внешний вид хлебобулочных изделий. Формула (7) гарантирует адекватный состав смеси, обеспечивая соответствие стандартам качества. Формула (9) контролирует общие затраты на рецептуру, которые не должны превышать предельного значения.

В общем виде зависимость фактических значений характеристик хлебобулочных изделий имеет вид:

$$y_i(C_{\text{рж}}, t_{\text{увл}}, t_{\text{обж}}, t_{\text{доп}}) = a_1 + a_2 \cdot C_{\text{рж}} + a_3 \cdot t_{\text{увл}} + a_4 \cdot t_{\text{обж}} + a_5 \cdot t_{\text{доп}}, \quad (10)$$

где a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 — коэффициенты, определяющие влияние переменных на параметр.

Сбор данных и идентификация параметров модели

В математической модели есть параметры, требующие идентификации: $y_{i_{\text{цел}}}, w_i$ и a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 . Дальнейшие исследования и анализ необходимы для их

определения. Важный этап процесса идентификации коэффициентов модели — сбор и структуризация данных.

Выбор i качественных характеристик $y_i(C_{\text{рж}}, t_{\text{увл}}, t_{\text{обж}}, t_{\text{доп}})$ для оценки хлебобулочных изделий заключается в определении потребительских свойств продукции. Эти параметры комплексно отражают качество продукции. Для определения значений $y_{i_{\text{цел}}}$ и w_i потребовалось обратиться к мнению опытных экспертов. Экспертные оценки позволяют заполнять пробелы в данных. Полученные результаты $y_{i_{\text{цел}}}$ систематизированы в Таблице 2.

Следующим этапом стала идентификация коэффициентов a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 . Для этого был собран ряд данных, но каждая качественная характеристика $y_i(C_{\text{рж}}, t_{\text{увл}}, t_{\text{обж}}, t_{\text{доп}})$ зависит от переменных, значения которых выражены в разных единицах измерения ($C_{\text{рж}}$ — в %, а $t_{\text{увл}}, t_{\text{обж}}, t_{\text{доп}}$ — в мин). Значит, их нужно нормировать (Таблица 3).

Для $C_{\text{рж}}$ исходный диапазон значений — от 30 до 70%, для $t_{\text{увл}}$ — от 0 до 3 мин, для $t_{\text{обж}}$ — от 0 до 6 мин, для $t_{\text{доп}}$ — от 30 до 36 мин. Для нормирования ряда значений $t_{\text{увл}} = (0, 1, 2, 3)$ в промежуток от -1 до 1 выполнены следующие шаги:

1. Найдены минимальное ($t_{\text{увл min}} = 0$) и максимальное ($t_{\text{увл max}} = 3$) значения.
2. Применена формула нормализации для каждого значения:

$$t'_{\text{увл}} = \frac{2(t_{\text{увл}} - t_{\text{увл min}})}{t_{\text{увл max}} - t_{\text{увл min}}} - 1.$$

Тогда нормированный ряд значений получится таким: $t'_{\text{увл}} = (-1, -0,33, 0,33, 1)$. С целью выявления зависимостей между переменными в отношении каждого из параметров $y_i(C_{\text{рж}}, t_{\text{увл}}, t_{\text{обж}}, t_{\text{доп}})$ применен метод множественной регрессии.

Таблица 2

Выборка данных экспертного опроса и идентификация коэффициентов

Table 2

Sample Data from Expert Survey and Identification of Coefficients

Порядковый номер эксперта	Качественные характеристики ($y_{i_цел}$) и их важность (w_i)											
	$y_{1_цел}$	w_1	$y_{2_цел}$	w_2	$y_{3_цел}$	w_3	$y_{4_цел}$	w_4	$y_{5_цел}$	w_5	$y_{6_цел}$	w_6
1	0,60	0,70	0,43	0,50	2,51	0,90	72,30	0,90	72,30	0,60	7,10	0,90
2	0,50	0,90	0,50	0,90	2,60	0,70	82,00	0,80	82,00	1,00	7,60	0,90
3	0,60	0,80	0,45	1,00	2,80	0,80	75,00	0,90	85,00	0,90	7,50	1,00
4	0,90	0,70	0,60	0,80	3,00	0,70	85,00	1,00	80,00	0,80	6,75	1,00
5	0,75	0,60	0,45	0,90	2,50	0,80	74,00	1,00	75,00	0,70	6,80	0,80
6	0,60	0,50	0,35	1,00	2,42	0,70	71,00	1,00	80,00	0,60	7,00	0,90
7	0,70	0,80	0,50	0,90	2,40	0,60	84,00	0,90	85,00	0,70	7,30	1,00
8	0,80	0,90	0,60	0,90	2,60	0,50	80,00	0,80	90,00	0,60	7,40	0,90
9	0,60	0,80	0,65	1,00	2,50	0,60	80,00	0,90	85,00	0,70	7,00	0,80
10	0,90	0,90	0,50	0,90	2,45	0,70	88,00	0,90	90,00	0,80	7,50	0,70
Среднее значение	0,70	0,76	0,50	0,88	2,58	0,70	79,00	0,91	82,43	0,74	7,20	0,89

Таблица 3

Обучающий набор данных. Характеристики хлебулочных изделий при различных вариантах режима выпечки и при разном содержании ржаной обдирной муки (значения переменных нормированы)

Table 3

Training Data Set. Characteristics of Bakery Products under Different Baking Conditions and with Different Rye Flour Content (variable values are normalized)

№ опыта	Переменные				Характеристики					
	$C_{рж}$	$t_{увл}$	$t_{обж}$	$t_{доп}$	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6
1	0	1	0	-0,33	0,61	0,37	2,62	72	75,6	6,6
2	0,7	0,33	0,67	0,67	0,55	0,42	2,38	66	68,5	6,7
3	0	0,33	0	1	0,47	0,39	2,58	70	67,4	6,8
4	0	0,33	0	1	0,52	0,38	2,77	72	67,4	6,9
5	0	0,33	1	1	0,58	0,42	2,49	73	69,2	7,0
6	0	0,33	0	0	0,58	0,43	2,50	76	73,8	7,0
7	0	0,33	-0,33	0	0,59	0,42	2,44	74	71,2	7,1
8	0	0,33	0	0	0,62	0,42	2,50	74	75,0	7,1
9	0	0,33	0	0	0,6	0,43	2,51	73	72,3	7,1
10	1	0,33	0	0	0,65	0,41	2,32	69	68,1	7,2
11	0	0,33	0	0	0,57	0,42	2,41	72	71,8	7,3
12	0	0,33	0	0	0,61	0,41	2,45	75	74,3	7,3
13	-0,7	0,33	-0,67	0,67	0,65	0,47	2,58	74	81,2	7,4
14	0	0,33	0,33	-0,33	0,61	0,43	2,49	73	71,4	7,5
15	0	0,33	0	0	0,6	0,42	2,51	73	73,9	7,5
16	0,7	0,33	0,67	-0,67	0,67	0,47	2,25	69	75,5	7,9
17	-0,7	0,33	0,67	-0,67	0,71	0,49	2,41	76	75	7,9
18	-1	0,33	0	0	0,73	0,49	2,46	78	83,2	7,9
19	0	0,33	1	-1	0,63	0,48	2,5	72	79,7	8,1
20	0	-1	0	0,67	0,51	0,36	2,32	67	68,5	8,6

Для практического применения определены диапазоны применимости оптимизационной модели: содержание ржаной муки — от 30 до 70 %, продолжительность увлажнения — от 1 до 4 мин, обжарки — от 1 до 6 мин, допекания — от 15 до 40 мин. Анализ чувствительности показал, что оптимум целевой функции устойчив к малым вариациям коэффициентов значимости, что снижает риск непредсказуемых изменений параметров выпечки. Это подтверждает применимость модели в условиях производственной неопределенности. Оценка устойчивости оптимума в терминах влияния весовых коэффициентов на градиенты поиска будет детально рассмотрена в последующих публикациях по математическому анализу модели.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ существующих решений

На российском рынке представлено большое количество MES-решений, предназначенных для управления производственными процессами. Среди наиболее известных решений можно выделить как отечественные разработки, так и продукты международных компаний: «АЙЛЭНД-ЭК» («Терсис», Россия), 1С: MES («1С», Россия), Easy95 ODS (Ninety-five, Бельгия), «Большое Дело» («Астра-Софт», Беларусь), MEScontrol (BrightEye, Бельгия), Wonderware MES Software (Wonderware, США), HYDRA (MPDV, Германия) и множество других.

Несмотря на разнообразие этих систем, не все из них могут быть использованы в производстве хлебобулочных изделий. Одной из причин является приостановка поставок и поддержки программного обеспечения в России из-за введенных санкций, что делает внедрение подобных решений рискованным и в долгосрочной перспективе нецелесообразным. Примеры таких продуктов: SAP ME, Simatic IT Production Suite.

С учетом этих факторов для дальнейшего исследования были выбраны несколько систем: «Галактика АММ», «1С: MES», MES «СКАЗ», MES «ФОБОС» и ERP/MES-система «ТЕХНОКЛАСС», «Фабриус» (локализация — «Хлебопёк»), АИС КХП (подсистема «Оптимум-хлебопродукт»). Для сравнения MES были выделены критерии оценки, однако основным недостатком существующих систем является

отсутствие модели и функций оптимизации параметров управления процессом выпечки (Зиновьева & Новицкий, 2025).

Таким образом, ни одна из оцененных систем не обладает специализированной подсистемой оптимального управления качеством выпекаемой продукции, что является существенным недостатком. В частности, отсутствует возможность расчета параметров печи (время выпечки в 1, 2 и 3 сектора), что важно для минимизации отклонений качества хлебобулочных изделий от стандартов. Таким образом, необходимо решить актуальную проблему создания подсистемы оптимизации управления процессом выпечки и её интеграции с лучшими существующими в отрасли хлебопечения ИСУ.

Построение регрессионных моделей и их оценка

Модели зависимостей y_1 – y_6 , полученные с применением метода множественного корреляционно-регрессионного анализа (11)–(16), проанализированы на основе значений коэффициента множественной корреляции. В дальнейшем из моделей исключались переменные, для которых значение коэффициента, определенное по t -критерию Стьюдента, превышало пороговое значение 0,005, что позволило повысить статистическую значимость зависимостей.

$$y_1(t_{увл}, t_{обж}) = 0,5938 + 0,0618 \cdot t_{увл} + 0,0704 \cdot t_{обж}, \quad (11)$$

$$y_2(t_{обж}) = 0,4242 + 0,0344 \cdot t_{обж}, \quad (12)$$

$$y_3(C_{рж}, t_{увл}, t_{обж}) = 2,4219 - 0,099 \cdot C_{рж} + 0,1262 \cdot t_{увл} + 0,0938 \cdot t_{обж}, \quad (13)$$

$$y_4(C_{рж}, t_{увл}) = 71,6450 - 4,9242 \cdot C_{рж} + 2,7986 \cdot t_{увл}, \quad (14)$$

$$y_5(C_{рж}, t_{обж}) = 72,7612 - 5,9697 \cdot C_{рж} + 3,5542 \cdot t_{обж}, \quad (15)$$

$$y_6(C_{рж}, t_{увл}, t_{обж}) = 7,5885 - 0,3005 \cdot C_{рж} - 0,8190 \cdot t_{увл} + 0,6077 \cdot t_{обж}. \quad (16)$$

Оценка качества аппроксимации регрессионных моделей проведена с использованием коэффициента множественной корреляции (R), коэффициента детерминации (R^2), стандартной ошибки аппроксимации (SE) и среднеквадратической ошибки (MSE) (Таблицы 4, 5).

Таблица 4

Показатели качества регрессионных моделей (R , R^2 , SE , MSE)

Table 4

Quality Indicators of Regression Models (R , R^2 , SE , MSE)

Модель	R	R^2	SE	MSE
(11)	0,78	0,61	0,04	0,0016
(12)	0,69	0,48	0,03	0,0009
(13)	0,82	0,67	0,07	0,0049
(14)	0,85	0,72	1,8	3,24
(15)	0,83	0,69	2,81	7,8961
(16)	0,89	0,79	0,27	0,0729

Таблица 5

Тестовый набор данных. Характеристики хлебобулочных изделий при различных вариантах режима выпечки и при разном содержании ржаной обдирной муки (значения переменных нормированы)

Table 5

Test Data Set. Characteristics of Bakery Products under Different Baking Regimes and Varying Contents of Rye Wholemeal Flour (variable values normalized).

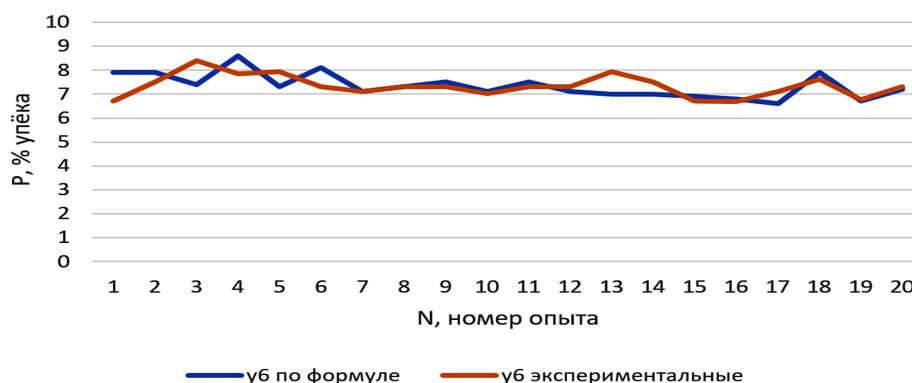
№ опыта	Переменные				Характеристики					
	$C_{рж}$	$t_{увл}$	$t_{обж}$	$t_{доп}$	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6
1	-0,12	0,36	-0,34	-0,2	0,59	0,42	2,44	74	71,2	7,1
2	-0,07	0,4	0	0,02	0,51	0,36	2,32	67	68,5	8,6
3	0,02	0,37	-1	1	0,6	0,42	2,51	73	73,9	7,5
4	0	0,36	0	0	0,57	0,42	2,41	72	71,8	7,3
5	-0,04	0,29	0,05	0,08	0,62	0,42	2,5	74	75	7,1
6	-0,02	0,35	-0,39	0,25	0,59	0,42	2,44	74	71,2	7,1
7	-0,02	1	0,02	-0,4	0,63	0,48	2,5	72	79,7	8,1
8	-0,11	0,28	0	0,02	0,57	0,42	2,41	72	71,8	7,3
9	0,04	0,24	0,03	0	0,57	0,42	2,41	72	71,8	7,3
10	0,02	-0,3	0,12	0,38	0,52	0,38	2,77	72	67,8	6,9
11	0	0,35	-0,05	-0,05	0,62	0,42	2,58	74	75	7,8
12	-0,09	-1	0,03	0,62	0,47	0,39	2,38	70	67,4	6,8
13	0,72	0,39	0,68	-0,64	0,55	0,42	2,45	66	68,5	6,7
14	-0,05	0,32	0,07	-0,06	0,61	0,41	2,5	75	74,3	7,3
15	0,05	0,42	0,02	-0,08	0,58	0,43	2,62	76	73,8	7
16	0,72	0,33	0,7	-0,63	0,55	0,42	2,38	66	68,5	6,7
17	-0,04	0,29	-1	-0,38	0,61	0,37	2,62	72	75,6	6,6
18	0	0,32	0,13	-0,05	0,61	0,41	2,45	75	74,3	7,3
19	0,04	0,35	0,04	0,11	0,61	0,41	2,45	75	74,3	7,3
20	-0,6	0,37	-0,65	0,71	0,71	0,49	2,41	76	75	7,9

Рисунок 2

Графики экспериментальных данных и данных, полученных по формуле для y_6

Figure 2

Graphs of Experimental Data and Data Obtained Using the Formula for y_6



Значения коэффициента детерминации R^2 по моделям варьируются от 0,48 до 0,79, что указывает на приемлемое качество аппроксимации при учете ограниченности выборки. Можно заметить, что после анализа моделей во всех зависимостях была выявлена низкая значимость коэффициентов переменной $t_{доп}$. На Рисунке 2 представлен график с изображением экспериментальных данных, показывающий зависимость, выявленную для y_6 .

использована библиотека Apache Commons Math, содержащая процедуру GradientDescentOptimizer (Ташматова, 2024). Приведенные выводы считаются условными, если время допекания было определено экспертами как важное.

Экспериментальные исследования на модели

Эксперимент № 1

Программное обеспечение (ПО) интерфейса для апробации модели реализовано на языке JavaScript. Для использования процедур оптимизации была

Эксперимент № 1 был проведен для оценки влияния начальных значений переменных на результаты оптимизации. Изменение значений начальных приближений в использованной процедуре градиентного спуска показало среднеквадратическое отклонение результатов менее, чем на 5%. Результаты оптимизации были занесены в Таблицу 6.

Таблица 6

Результаты эксперимента № 1. Оценка влияния начальных значений переменных ($p_1 - p_4$, усл. ед.)

Table 6

Results of Experiment No. 1. Assessment of the Influence of Initial Variable Values ($p_1 - p_4$, arbitrary units)

№ п/п	Рекомендуемые параметры				Начальное приближение			
	$C_{рж}$	$t_{увл}$	$t_{обж}$	$t_{доп}$	p_1	p_2	p_3	p_4
1	40	4	6	25	-100	-100	-100	-100
2	40	4	6	25	0	0	0	0
3	40	4	6	25	1	1	1	1
4	40	4	6	25	2	2	2	2
5	40	4	6	25	4	4	4	4
6	40	4	6	25	100	100	100	100

Эксперимент № 2

Эксперимент № 2 проведен для оценки влияния коэффициентов важности качественных характеристик на оптимальные параметры выпечки. Результаты эксперимента приведены в Таблицах 7–12. Каждый параметр оценивался поочередно, в то время как остальные коэффициенты оставались нулевыми.

Анализ результатов эксперимента № 2 показал, что наибольшее влияние на параметры оптимума оказывают коэффициенты важности для показателей пористости и общей деформации (суммарно до 77%) и удельного объема (66%). Это указывает на высокую чувствительность целевой функции к данным характеристикам и требует особого внимания оператора при их изменении. Параметры глянца и формоустойчивости оказывают умеренное влияние (36% и 22% соответственно), что позволяет варьировать их в более широких пределах без существенного смещения оптимума.

Таблица 7

Результаты эксперимента № 2.1. Оценка влияния коэффициентов важности качественной характеристики «Глянец» на оптимальные параметры выпечки. Требуемые обозначения, ограничения = const

Table 7

Results of experiment No. 2.1. Assessment of the Influence of the Importance Coefficients of the Qualitative Characteristic "Gloss" on the Optimal Baking Parameters. Required Designations, Constraints = const

№ п/п	Рекомендуемые параметры				w ₁
	C _{рж}	t _{увл}	t _{обж}	t _{доп}	
1	80	4	6	40	0
2	80	4	6	40	0,1
3	79	5	7	40	0,2
4	79	5	7	40	0,3
5	79	5	8	40	0,4
6	79	6	8	40	0,5
7	78	6	8	40	0,6
8	78	6	9	40	0,7
9	78	7	9	40	0,8
10	78	7	10	40	0,9
11	78	7	10	40	1

Таблица 8

Результаты эксперимента № 2.2. Оценка влияния коэффициентов важности качественной характеристики «Способность сохранять форму» (формоустойчивость) на оптимальные параметры выпечки. Требуемые обозначения, ограничения = const

Table 8

Results of Experiment No. 2.2. Assessment of the Influence of Importance Coefficients of the Quality Characteristic "Ability to Retain Shape" (Shape Stability) on Optimal Baking Parameters. Required Notations, Constraints = const

№ п/п	Рекомендуемые параметры				w ₂
	C _{рж}	t _{увл}	t _{обж}	t _{доп}	
1	80	4	6	40	0
2	80	4	6	40	0,1
3	80	4	6	40	0,2
4	80	4	6	40	0,3
5	79	4	7	40	0,4
6	79	5	7	40	0,5
7	79	5	7	40	0,6
8	79	5	7	40	0,7
9	79	5	7	40	0,8
10	79	5	7	40	0,9
11	79	5	8	40	1

Таблица 9

Результаты эксперимента № 2.3. Оценка влияния коэффициентов важности качественной характеристики «Удельный объем» на оптимальные параметры выпечки. Требуемые обозначения, ограничения = const

Table 9

Results of experiment No. 2.3. Assessment of the Influence of the Importance Coefficients of the Qualitative Characteristic "Specific Volume" on the Optimal Baking Parameters. Required Designations, Constraints = const

№ п/п	Рекомендуемые параметры				w ₃
	C _{рж}	t _{увл}	t _{обж}	t _{доп}	
1	80	4	6	40	0
2	78	6	5	40	0,1
3	77	8	3	40	0,2
4	76	9	2	40	0,3
5	74	10	1	40	0,4
6	73	10	0	40	0,5
7	72	10	0	40	0,6
8	71	10	0	40	0,7
9	70	10	0	40	0,8
10	69	10	0	40	0,9
11	68	10	0	40	1

Таблица 10

Результаты эксперимента № 2.4. Оценка влияния коэффициентов важности качественной характеристики «Пористость» на оптимальные параметры выпечки. Требуемые обозначения, ограничения = const

Table 10

Results of experiment No. 2.4. Assessment of the Influence of the Importance Coefficients of the Qualitative Characteristic "Porosity" on the Optimal Baking Parameters. Required Designations, Constraints = const

№ п/п	Рекомендуемые параметры				w_4
	$C_{рж}$	$t_{увл}$	$t_{обж}$	$t_{доп}$	
1	80	4	6	40	0
2	7	10	10	40	0,1
3	7	10	10	40	0,2
4	7	10	10	40	0,3
5	7	10	10	40	0,4
6	7	10	10	40	0,5
7	7	10	10	40	0,6
8	7	10	10	40	0,7
9	7	10	10	40	0,8
10	7	10	10	40	0,9
11	7	10	10	40	1

Таблица 11

Результаты эксперимента № 2.5. Оценка влияния коэффициентов важности качественной характеристики «Общая деформация» на оптимальные параметры выпечки. Требуемые обозначения, ограничения = const

Table 11

Results of experiment No. 2.5. Assessment of the Influence of the Importance Coefficients of the Qualitative Characteristic "Total Deformation" on the Optimal Baking Parameters. Required Designations, Constraints = const

№ п/п	Рекомендуемые параметры				w_5
	$C_{рж}$	$t_{увл}$	$t_{обж}$	$t_{доп}$	
1	80	4	6	40	0
2	10	10	10	39	0,1
3	10	10	10	39	0,2
4	10	10	10	39	0,3
5	10	10	10	39	0,4
6	10	10	10	39	0,5
7	10	10	10	39	0,6
8	10	10	10	39	0,7
9	10	10	10	39	0,8
10	10	10	10	39	0,9
11	10	10	10	39	1

Таблица 12

Результаты эксперимента № 2.6. Оценка влияния коэффициентов важности качественной характеристики «Упёк» на оптимальные параметры выпечки. Требуемые обозначения, ограничения = const

Table 12

Results of experiment No. 2.6. Assessment of the Influence of the Importance Coefficients of the Qualitative Characteristic "Baking Loss" on the Optimal Baking Parameters. Required Designations, Restrictions = const

№ п/п	Рекомендуемые параметры				w_6
	$C_{рж}$	$t_{увл}$	$t_{обж}$	$t_{доп}$	
1	80	4	6	40	0
2	70	0	10	40	0,1
3	62	0	10	40	0,2
4	55	0	10	40	0,3
5	45	0	10	40	0,4
6	45	0	10	40	0,5
7	41	0	10	40	0,6
8	38	0	10	40	0,7
9	35	0	10	40	0,8
10	33	0	10	40	0,9
11	31	0	10	40	1

Эксперимент № 3

Эксперимент № 3 был проведен для анализа влияния ограничений на результаты оптимизации. В ходе эксперимента требуемые значения качественных характеристик были зафиксированы. Результаты эксперимента (Таблица 13) показывают, что изменение границ имеет менее существенное влияние на оптимальные значения по сравнению с изменением коэффициентов важности. Однако оптимальные параметры остаются в пределах заданных границ.

Эксперимент № 4

Эксперимент № 4 проведен с целью оценки влияния стоимостных ограничений на оптимальные параметры рецептуры при заданных значениях коэффициентов важности качественных характеристик и неизменных ограничениях. Результаты эксперимента представлены в Таблице 14.

Таблица 13

Результаты эксперимента № 3. Анализ влияния ограничений

Table 13

Results of Experiment No. 3. Analysis of the Impact of Restrictions

№ п/п	Рекомендуемые параметры				Содержание ржаной муки, %		Продолжительность выпечки в секторе, мин					
	C _{рж}	t _{увл}	t _{обж}	t _{доп}	от	до	t _{увл}		t _{обж}		t _{доп}	
							от	до	от	до	от	до
1	0	2	2	40	0	100	0	5	0	5	15	60
2	1	3	3	40	0	100	3	5	3	5	15	60
3	1	3	3	30	0	100	3	5	3	5	15	30
4	1	3	3	15	0	100	3	5	3	5	15	15
5	20	5	5	15	30	100	0	5	0	5	15	60
6	40	5	5	15	40	100	0	5	0	5	15	60
7	60	5	5	15	60	100	0	5	0	5	15	60
8	80	5	5	15	80	100	0	5	0	5	15	60

Таблица 14

Результаты эксперимента № 4. Оценка влияния стоимостных ограничений на оптимальные параметры рецептуры

Table 14

Results of Experiment No. 4. Evaluation of the Impact of Cost Constraints on Optimal Formulation Parameters

№ п/п	Ржаная мука		Пшеничная мука		Закваска		Соль		Дрожжи		Предельная стоимость рецептуры, руб. за 100 кг
	масса, кг	цена, руб./кг	масса, кг	цена, руб./кг	масса, кг	цена, руб./кг	масса, кг	цена, руб./кг	масса, кг	цена, руб./кг	
1	0	15	100	32	57	200	1,5	80	1,5	774	15 107
2	20	15	80	32	57	200	1,5	80	1,5	774	15 104
3	40	15	60	32	57	200	1,5	80	1,5	774	15 100
4	60	15	40	32	57	200	1,5	80	1,5	774	15 097
5	80	15	20	32	57	200	1,5	80	1,5	774	15 093
6	100	15	0	32	57	200	1,5	80	1,5	774	15 090

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Апробация модели в эмуляционной среде показала не только её работоспособность, но и количественно подтвердила гипотезу о том, что задачи оптимизации процессов выпечки могут быть интегрированы в MES с реальным экономическим и технологическим эффектом. Снижение средних отклонений по ключевым характеристикам качества на 15% и сокращение затрат на сырье на 7% свидетельствуют о том, что интеграция управленческого и технологического уровней позволяет балансировать между качеством и себестоимостью, что ранее не демонстрировалось в отечественных моделях.

Анализ чувствительности весовых коэффициентов выявил технологическую иерархию показателей: пористость теста, удельный объем и степень упёка формируют ядро качества, на которое оператор должен реагировать в первую очередь. Такая расстановка приоритетов уточняет роль специалиста-технолога: вместо интуитивного выбора режимов выпечки он получает инструмент, позволяющий управлять наиболее значимыми параметрами с опорой на количественные оценки.

Сравнение с зарубежными методами выявило принципиальные различия. Например, NSGA-II применялся для оптимизации расписаний печей

(Babor et al., 2022), Fuzzy ANP и Fuzzy TOPSIS использовались для формализации экспертных оценок (Serpa et al., 2022), Yin et al. (2024) применяли машинное обучение для прогнозирования качества. Эти работы важны для отдельных аспектов: сокращения простоев, цифровизации экспертных знаний или прогнозирования, но они не формируют интегрированного управленческого контура. Разработанная модель восполняет этот пробел: она объединяет контроль качества и регулировку технологических параметров, обеспечивая интерпретируемость решений для специалистов и управляемую оптимизацию в MES.

Изученные исследования фокусировались на отдельных элементах производственного управления. Так, Babor и Hitzmann (2023) показали, что оптимизация оборудования снижает простои, но не затрагивает устойчивость качества продукции. Wu и соавт. (2023) рассматривали задачи логистики скоропортящихся продуктов, оставаясь вне рамок технологического контура. Yin и соавт. (2024) применили attention-механизмы для прогнозирования параметров качества, однако их подход ограничен предсказательной функцией и не предполагает вмешательства в режимы производства. На этом фоне разработанная модель решает более комплексную задачу — она объединяет контроль качества и регулировку параметров процесса непосредственно на уровне производства, обеспечивая интерпретируемость и возможность практического применения. При этом наши результаты согласуются с выводами Li и соавт. (2023) о том, что алгоритмы оптимизации повышают гибкость и эффективность производства. Включение адаптивной корректировки рецептур и режимов выпечки позволяет достичь этих эффектов в реальном времени.

Более того, количественный анализ показал, что интеграция модели снижает вариативность качества по трем ключевым показателям (пористость — 14%, удельный объем — 12%, степень упёка — 10%) и одновременно обеспечивает экономический эффект (-7% затрат на сырье). Результаты указывают на возможность практического применения: модель не только работает в абстрактной эмуляции, но и отражает реальную производственную задачу — минимизацию разброса показателей качественных характеристик хлебобулочных изделий при ограниченных ресурсах. Оптимизация тех-

нологических режимов должна рассматриваться не как вспомогательный инструмент, а как элемент интегрированной системы управления, сопоставимой по значимости с логистикой и планированием.

Ограничения исследования

Ограничения исследования связаны с использованием данных эмуляции реальных параметров управления, что не позволяет учесть весь спектр случайных колебаний, возникающих на реальном производстве. Опытная эксплуатация задачи на производстве нескольких конкретных предприятий является ближайшей перспективой развития модели и соответствующего ПО. Размер экспертной выборки (более 20 участников) ограничивает статистическую устойчивость весовых коэффициентов. Возможен риск переобучения при переносе модели на реальные производства предприятий с отличающимися характеристиками сырья и технологического оборудования.

Направления дальнейших исследований

Для повышения точности и устойчивости планируется расширение базы данных за счет реальных производственных наблюдений, включение сезонных колебаний качества муки и тестирование адаптивных методов оптимизации (например, Adam) для работы с шумными функциями. Влияние коэффициентов значимости на форму целевой функции и градиенты поиска будет предметом отдельного исследования по математическому анализу модели.

Переносимость предложенного подхода видится перспективной для других сегментов пищевой промышленности, где технологический процесс чувствителен к вариациям качества сырья и режимов обработки (например, мучное кондитерское производство и др., где есть процессы выпекания и подобные). Адаптация в этих условиях потребует перенастройки весовых коэффициентов и диапазонов переменных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена информационная система оптимального управления процессом выпечки хлебобулочных изделий, реализованная как программный модуль для интегрированной MES-среды. Система основана на нелинейной математической модели условной многомерной оптимизации, позволяющей минимизировать отклонения по качеству продукции с учетом расхода сырья по рецептуре и технологических ограничений.

Апробация разработанного модуля в эмуляционной среде показала сокращение отклонений по ключевым качественным характеристикам на 15% (при целевом значении $\geq 15\%$) и снижение затрат на сырье на 7% (при целевом значении $\geq 5\%$). Таким образом, заявленные в исследовании цели были достигнуты и по обоим показателям выполнены.

Теоретический вклад работы заключается в разработке и демонстрации применимости математической модели и методов условной многомерной оптимизации управления качеством в слабо формализуемых условиях процессов переработки сельхозсырья.

Практический вклад заключается в разработке программного модуля для интеграции в MES, который обеспечивает автоматизированное формирование технологических карт и оперативный контроль качества. Разработанный прототип обладает потенциалом промышленной интеграции и может быть адаптирован для целого ряда других видов производств, связанных с переработкой сельхозсырья.

Переносимость подхода обусловлена универсальностью математической постановки, однако требует перенастройки весовых коэффициентов, диапазонов переменных и учета специфики сырья. В то же время современные исследования подтверждают перспективность применения подобных систем в хлебопекарной промышленности, что подчеркивает актуальность предложенного подхода.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Владимир Олегович Новицкий: разработка концепции; разработка методологии; предоставление ресурсов; научное руководство; валидация результатов; создание рукописи, её рецензирование и редактирование.

Мария Алексеевна Зиновьева: написание черновика рукописи; создание рукописи, её рецензирование и редактирование; визуализация; разработка программного обеспечения; валидация результатов; проведение исследования; формальный анализ.

AUTHORS CONTRIBUTION

Vladimir O. Novitsky: Conceptualization; Methodology; Resources; Supervision; Validation; Writing — Review & Editing.

Maria A. Zinovieva: Writing — Original Draft Preparation; Visualization; Software; Validation; Investigation; Formal Analysis.

ЛИТЕРАТУРА

- Абрамов, Г. И. (2020). О применении информационно-аналитических систем в условиях развития современных информационно-коммуникационных технологий. *STUDNET*, 3(4), 632–637.
- Агапкин, А. М., & Махотина, И. А. (2021). К вопросу о состоянии российского зернового рынка. *Международная торговля и торговая политика*, 7(3), 133–148. <https://doi.org/10.21686/2410-7395-2021-3-133-148>
- Ашмарова, О. В., & Федулова, Е. А. (2016). Возможности применения автоматизированных информационных систем управления предприятиями пищевой промышленности. *Техника и технология пищевых производств*, 41(2), 170–176.
- Белова, Ю. Н., Новицкий, В. О., Гарев, К. В., & Дорофеева, А. С. (2020). Автоматизированная система планирования и контроля загрузки производственных линий на хлебокомбинате. *Хлебопродукты*, (7), 36–42. <https://doi.org/10.32462/0235-2508-2020-29-7-36-42>

- Егушова, Е. А., & Позднякова, О. Г. (2018). Технологические аспекты производства хлеба функционального назначения. *Достижения науки и техники АПК*, 32(12), 90–93. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2018-11225>
- Ефремова, Е. Н. (2016). Оценка качества хлебобулочных изделий. *Аграрный вестник Северного Кавказа*, 3(23), 20–24.
- Зиновьева, М. А., & Новицкий, В. О. (2025). Анализ MES систем и оптимизация процессов хлебопекарного производства. *Информационно-аналитические и интеллектуальные системы для производства и социальной сферы: Сборник статей III Всероссийской межвузовской научно-практической конференции молодых учёных* (с. 138–146). Москва: РОСБИОТЕХ.
- Конева, Д. А. (2019). Современные ERP-системы на российском рынке: сравнительный обзор. *Academy*, 4(43), 43–46.
- Котанджян, А. В., & Биндзяр, Д. А. (2023). Анализ современных информационно-аналитических систем. *Студент. Наука. Регион*, (1), 65–69. <https://doi.org/10.24412/cl-37131-2023-1-65-69>
- Мелешкина, Е.П., Жильцова, Н.С., Коломиец, С.Н., & Бундина, О.И. (2019). Сравнение российской оценки хлебопекарных свойств пшеницы и определение качества зерна с использованием миксолаба. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 81(3), 70–80. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2019-3-70-80>
- Новицкий, В. О. (2011). *Методология общесистемного проектирования автоматизированных систем*. Москва: Издательство МГУПП.
- Новицкий, В. О., & Мерцалов, А. Н. (2008). Автоматизированная система расчета оптимальных рецептов помольных смесей. *Хлебопродукты*, (2), 66–68.
- Прахов, А. Д. (2015). Процесс учета и методы автоматизации дозирования муки в рамках производственного цикла хлебозавода. *Science Time*, 5(17), 365–370.
- Рязанцева, Е. А. (2023). Применение корреляционно-регрессионного инструментария для анализа социально-значимых факторов. *ЭФО: Экономика. Финансы. Общество*, 1(5), 65–74. <https://doi.org/10.24412/2782-4845-2023-5-65-74>
- Ташматова, Ш. С. (2024). Алгоритмы, оптимизированные для эффективного создания нейронных сетей. *Science and Innovation*, 3(33), 531–535. <https://doi.org/10.5281/zenodo.11192924>
- Шибалова, К. А., & Новицкий, В. О. (2021). Автоматизированная система планирования отгрузки продукции на хлебокомбинате. *Информационно-аналитические и интеллектуальные системы для производства и социальной сферы: Сборник статей Всероссийской межвузовской конференции молодых учёных* (с. 145–154). Москва: МГУПП.
- Alonso, M., Pérez, J., & Rodríguez, L. (2024). Thermal characterization of a high-temperature industrial bread-baking oven: A comprehensive experimental and numerical study. *Applied Thermal Engineering*, 231, 121467. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121467>
- Babor, M., & Hitzmann, B. (2022). Application of nature-inspired multi-objective optimization algorithms to improve the bakery production efficiency. *Engineering Proceedings*, 19(1), 31. <https://doi.org/10.3390/ECP2022-12630>
- Babor, M., Paquet-Durand, O., Kohlus, R., & Hitzmann, B. (2023). Modeling and optimization of bakery production scheduling to minimize makespan and oven idle time. *Scientific Reports*, 13, 235. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26866-9>
- Čechura, L., & Jaghdani, T. J. (2021). Market imperfections within the european wheat value chain: The case of France and the United Kingdom. *Agriculture*, 11(9), 838. <https://doi.org/10.3390/agriculture11090838>
- El-Kholany, M., Ali, R., & Gebser, M. (2023). *Hybrid ASP-based multi-objective scheduling of semiconductor manufacturing processes*. Cornell University. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.14799>
- Fu, B., Bi, M., Umeda, S., Nakano, T., Nonaka, Y., Zhou, Q., Matsui, T., Tilbury, D. M., & Barton, K. (2025). Digital twin-based smart manufacturing: Dynamic line reconfiguration for disturbance

- handling. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 22, 14892–14905. <https://doi.org/10.1109/TASE.2025.3563320>
- Lee, J., Kim, Y., & Kim, S. (2023). The study of an adaptive bread maker using machine learning. *Foods*, 12(22), 4160. <https://doi.org/10.3390/foods12224160>
- Li, H., Pangborn, H. C., & Kovalenko, I. (2023, August). A system-level energy-efficient digital twin framework for runtime control of batch manufacturing processes. In *2023 IEEE 19th International Conference on Automation Science and Engineering. IEEE*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.10151>
- Luo, Z., Yang, W., Xu, K., Long, L., & Ye, H. (2025). Study on moisture phase changes in bread baking using a coupling model. *Foods*, 14(9), 1649. <https://doi.org/10.3390/foods14091649>
- Marinho, L. M., Barreto, S. M., Barreto, M. A., Ferreira, R. M., Ferreira, M. S., Carvalho, C. W., & Takeiti, C. Y. (2025). Exploring the role of baking process on technological, functional, and α -Amylase inhibition properties of pearl millet bread. *ACS Food Science & Technology*, 5(3), 1132–1144. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.4c00987>
- Melesse, T. Y., Peer, M. S., Ramasamy, S., Sivasubramaniyam, V., Braggio, M., & Orrù, P. F. (2025). Digital twin for energy-intelligent bakery operations: Concepts and applications. *Energies*, 18(14), 3660–3678. <https://doi.org/10.3390/en18143660>
- Rossit, D., Rossit, D., & Nesmachnow, S. (2024). Enhancing mass customization manufacturing: multiobjective metaheuristic algorithms for flow shop production in smart industry. *SN COMPUTER SCIENCE*, 5, 782–806. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.15802>
- Serpa, N. P., Silva, D. J. C., Wegner, R. D. S., & Stertz, E. D. S. (2022). Quality and sustainability in the production process: A study of bakeries using an integrated multi-criteria method based on fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS. *Environmental Quality Management*, 1(1), 251–262. <https://doi.org/10.1002/tqem.21906>
- Timar, A. V., Teusdea, A. C., Purcarea, C., Vuscan, A. N., Memete, A. R., & Vicas, S. I. (2023). Chemometric analysis-based sustainable use of different current baking wheat lots from romania and hungary. *Sustainability*, 15(17), 12756. <https://doi.org/10.3390/su151712756>
- Wu, Y., Zhang, J., Li, Q., & Tan, H. (2023). Research on real-time robust optimization of perishable supply-chain systems based on digital twins. *Sensors*, 23(4), 1850. <https://doi.org/10.3390/s23041850>
- Yin, Y., Wang, L., Hoang, D. T., Wang, W., & Niyato, D. (2024). Sparse attention-driven quality prediction for production process optimization in digital twins. *IEEE Internet of Things Journal*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.11895>

REFERENCES

- Abramov, G. I. (2020). On the application of information-analytical systems under conditions of development of modern information-communication technologies. *STUDNET*, 3(4), 632–637. (In Russ.)
- Agapkin, A. M., & Makhotina, I. A. (2021). On the state of the Russian grain market. *International Trade and Trade Policy*, 7(3), 133–148. (In Russ.). <https://doi.org/10.21686/2410-7395-2021-3-133-148>
- Ashmarova, O.V., & Fedulova, E. A. (2016). Automated management information systems at food enterprises. *Food Processing: Techniques and Technology*, 41(2), 170–176. (In Russ.).
- Belova, Yu. N., Novitsky, V. O., Garev, K. V., & Dorofeeva, A. S. (2020). Automated system for planning and controlling the load of production lines at a bakery. *Bread Products*, (7), 36–42. (In Russ.). <https://doi.org/10.32462/0235-2508-2020-29-7-36-42>
- Egushova, E. A., & Pozdnyakova, O. G. (2018). Technological aspects of bread production for a functional purpose. *Achievements in Science and Technology in the Agro-Industrial Complex*, 32(12), 90–93. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2018-11225>

- Efremova, E. N. (2016). Quality evaluation of bakery products. *Agricultural Gazette of the North Caucasus*, 3(23), 20–24. (In Russ.)
- Zinovieva, M. A., & Novitsky, V. O. (2025). Analysis of MES systems and optimization of bread baking processes. Information, analytical, and intelligent systems for production and the social sphere: *Collection of articles from the III All-Russian Interuniversity Scientific and Practical Conference of Young Scientists*. Moscow: ROSBIOTECH, 138–146. (In Russ.)
- Koneva, D. A. (2019). Modern ERP systems on the Russian market: a comparative review. *Academy*, 4(43), 43–46. (In Russ.)
- Kotanjian, A. V., & Bindzyar, D. A. (2023). Analysis of modern information and analytical systems. *Student. Science. Region*, (1), 65–69. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/cl-37131-2023-1-65-69>
- Meleshkina, E.P., Zhiltsova, N.S., Kolomiets, S.N., & Bundina, O.I. (2019). Comparison of Russian assessment of bakery properties of wheat and determination of grain quality using mixolab. *Proceedings of VSVET*, 81(3), 70–80. (In Russ.). <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2019-3-70-80>
- Novitsky, V. O. (2011). Methodology of system-wide design of automated systems. Moscow: MGUP Publishing House. (In Russ.)
- Novitsky, V. O., & Mertsalov, A. N. (2008). Automated system for calculating optimal recipes for milling mixtures. *Bread Products*, (2), 66–68. (In Russ.)
- Prakhov, A. D. (2015). Accounting process and methods of automation of flour dosing within the production cycle of a bread factory. *Science Time*, 5(17), 365–370. (In Russ.)
- Ryazantseva, E. A. (2023). The use of correlation-regression tools for the analysis of socially significant factors. *EFS: Economy. Finance. Society*, 1(5), 65–74. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2782-4845-2023-5-65-74>
- Tashmatova, Sh. S. (2024). Algorithms optimized for efficient neural network creation. *International scientific and practical conference "Innovative management in the education system: international and national concepts"*, 3(33), 531–535. (In Russ.). <https://doi.org/10.5281/zenodo.11192924>
- Shibalova, K. A., & Novitsky, V. O. (2021). Automated system for planning product shipments at a bakery. *Information, analytical, and intelligent systems for manufacturing and the social sphere: Collection of articles from the All-Russian interuniversity conference of young scientists* (pp. 144–145). Moscow: MGUPP. (In Russ.)
- Alonso, M., Pérez, J., & Rodríguez, L. (2024). Thermal characterization of a high-temperature industrial bread-baking oven: A comprehensive experimental and numerical study. *Applied Thermal Engineering*, 231, 121467. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121467>
- Babor, M., & Hitzmann, B. (2022). Application of nature-inspired multi-objective optimization algorithms to improve the bakery production efficiency. *Engineering Proceedings*, 19(1), 31. <https://doi.org/10.3390/ECP2022-12630>
- Babor, M., Paquet-Durand, O., Kohlus, R., & Hitzmann, B. (2023). Modeling and optimization of bakery production scheduling to minimize makespan and oven idle time. *Scientific Reports*, 13, 235. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26866-9>
- Čechura, L., & Jaghdani, T. J. (2021). Market Imperfections within the European wheat value chain: The case of France and the United Kingdom. *Agriculture*, 11(9), 838. <https://doi.org/10.3390/agriculture11090838>
- El-Kholany, M., Ali, R., & Gebser, M. (2023). Hybrid ASP-based multi-objective scheduling of semiconductor manufacturing processes. *Cornell University*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.14799>
- Fu, B., Bi, M., Umeda, S., Nakano, T., Nonaka, Y., Zhou, Q., Matsui, T., Tilbury, D. M., & Barton, K. (2025). Digital Twin-Based Smart Manufacturing: Dynamic Line Reconfiguration for Disturbance Handling. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 22, 14892–14905. <https://doi.org/10.1109/TASE.2025.3563320>
- Lee, J., Kim, Y., & Kim, S. (2023). The study of an adaptive bread maker using machine learning. *Foods*, 12(22), 4160. <https://doi.org/10.3390/foods12224160>

- Li, H., Pangborn, H. C., & Kovalenko, I. (2023, August). A system-level energy-efficient digital twin framework for runtime control of batch manufacturing processes. *In 2023 IEEE 19th International Conference on Automation Science and Engineering. IEEE*, 1–6. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.10151>
- Luo, Z., Yang, W., Xu, K., Long, L., & Ye, H. (2025). Study on moisture phase changes in bread baking using a coupling model. *Foods*, 14(9), 1649. <https://doi.org/10.3390/foods14091649>
- Marinho, L. M., Barreto, S. M., Barreto, M. A., Ferreira, R. M., Ferreira, M. S., Carvalho, C. W., & Takeiti, C. Y. (2025). Exploring the role of baking process on technological, functional, and α -amylase inhibition properties of pearl millet bread. *ACS Food Science & Technology*, 5(3), 1132–1144. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.4c00987>
- Melesse, T. Y., Peer, M. S., Ramasamy, S., Sivasubramaniyam, V., Braggio, M., & Orrù, P. F. (2025). Digital twin for energy-intelligent bakery operations: Concepts and applications. *Energies*, 18(14), 3660, <https://doi.org/10.3390/en17143660>
- Rossit, D., Rossit, D., & Nesmachnow, S. (2024). Enhancing mass customization manufacturing: Multiobjective metaheuristic algorithms for flow shop production in smart industry. *SN COMPUTER SCIENCE*, 5, 782. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.15802>
- Serpa, N. P., Silva, D. J. C., Wegner, R. D. S., & Stertz, E. D. S. (2022). Quality and sustainability in the production process: A study of bakeries using an integrated multi-criteria method based on fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS. *Environmental Quality Management*, 1(1), 251–262. <https://doi.org/10.1002/tqem.21906>
- Timar, A. V., Teusdea, A. C., Purcarea, C., Vuscan, A. N., Memete, A. R., & Vicas, S. I. (2023). Chemometric analysis-based sustainable use of different current baking wheat lots from Romania and Hungary. *Sustainability*, 15(17), 12756. <https://doi.org/10.3390/su151712756>
- Wu, Y., Zhang, J., Li, Q., & Tan, H. (2023). Research on real-time robust optimization of perishable supply-chain systems based on digital twins. *Sensors*, 23(4), 1850. <https://doi.org/10.3390/s23041850>
- Yin, Y., Wang, L., Hoang, D. T., Wang, W., & Niyato, D. (2024). Sparse attention-driven quality prediction for production process optimization in digital twins. *IEEE Internet of Things Journal*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.11895>

ОБ АВТОРАХ

Новицкий Владимир Олегович – д. т. н., доц., профессор кафедры информатики и вычислительной техники пищевых производств Российского биотехнологического университета (125080, Москва, Российская Федерация, Волоколамское шоссе, 11), ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6793-4439>, SPIN-код: 7890–5920, nvo60@mgupp.ru

Зиновьева Мария Алексеевна – магистрант кафедры информатики и вычислительной техники пищевых производств Российского биотехнологического университета (125080, Москва, Российская Федерация, Волоколамское шоссе, 11), ORCID <https://orcid.org/0009-0000-4865-4415>, SPIN-код: 8523–5849, zinovievama03@gmail.com

ABOUT THE AUTHORS

Novitsky Vladimir Olegovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Informatics and Computer Technology in Food Production at the Russian University of Biotechnology (125080, Moscow, Russian Federation, Volokolamskoe Shosse, 11), ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6793-4439>, SPIN: 7890–5920, nvo60@mgupp.ru

Zinovieva Maria Alekseevna – Master's student of the Department of Informatics and Computer Technology in Food Production at the Russian University of Biotechnology (125080, Moscow, Russian Federation, Volokolamskoe Shosse, 11), ORCID <https://orcid.org/0009-0000-4865-4415>, SPIN: 8523–5849, zinovievama03@gmail.com