

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЦЕПТУР ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ХЛЕБА: КОМПЛЕКСНЫЙ ОБЗОР

¹А.Д. НУРМАНОВА* , ²М.Ж. КИЗАТОВА ,
³Д.А. ШАЙМЕРДЕНОВА , ¹А.Б. АБУОВА 

¹Международный инженерно-технологический университет, Республика Казахстан, 050012, Алматы, пр.Аль-Фараби, 93г/5

²НАО Казахский национальный медицинский университет им. С.Д. Асфендиярова, Республика Казахстан, 050012, Алматы, ул.Төле би 94

³ТОО «НПП «Инноватор», Республика Казахстан, 010000, Астана, ул.Каратал 2)
Электронная почта автора-корреспондента: nurmanovaakzharkyn@gmail.com*

В условиях возрастающего интереса к здоровому питанию и функциональным продуктам питания хлебные изделия рассматриваются как перспективный объект для целенаправленного формирования функциональных свойств. Современное развитие пищевых технологий требует перехода от эмпирического подбора рецептур к научно обоснованным методам моделирования и оптимизации состава хлебных изделий. Целью данной обзорной статьи является систематизация и анализ современных подходов к моделированию и оптимизации рецептур функционального хлеба с заданными технологическими, пищевыми и потребительскими свойствами. В работе рассмотрены основные направления исследований, связанные с использованием функциональных ингредиентов, математических, вычислительных и data-driven методов моделирования рецептур. Научная значимость исследования заключается в комплексном обобщении современных методов моделирования рецептур функционального хлеба и выявлении их преимуществ и ограничений. Практическая значимость обусловлена возможностью применения рассмотренных подходов при разработке новых хлебных изделий с прогнозируемыми свойствами и стабильным качеством. Методология исследования основана на анализе и обобщении научных публикаций, индексируемых в международных базах данных, с использованием методов системного анализа, сравнительного анализа и классификации. В результате проведенного обзора выявлены ключевые тенденции развития моделирования рецептур функционального хлеба, показана эффективность методов математической оптимизации и компьютерного моделирования при формировании заданных функциональных свойств. Сделан вывод о перспективности интеграции цифровых и интеллектуальных технологий в процессы разработки хлебных изделий. Ценность исследования заключается в формировании научной базы для дальнейших исследований в области моделирования функциональных хлебных изделий. Практическое значение результатов состоит в возможности их использования в научных исследованиях, образовательном процессе и хлебопекарной промышленности.

Ключевые слова: функциональный хлеб, моделирование рецептур, оптимизация, функциональные ингредиенты, хлебные изделия, пищевая ценность.

ФУНКЦИОНАЛДЫҚ НАН РЕЦЕПТУРАЛАРЫН МОДЕЛЬДЕУ ЖӘНЕ ОҢТАЙЛАНДЫРУ: КЕШЕНДІ ШОЛУ

¹А.Д. НУРМАНОВА*, ²М.Ж. КИЗАТОВА, ³Д.А. ШАЙМЕРДЕНОВА, ¹А.Б. АБУОВА

¹Халықаралық инженерлік-технологиялық университеті, Қазақстан Республикасы, 050012, Алматы, Аль-Фараби даңғылы, 93г/5

²С.Ж. Асфендияров атындағы Қазақ ұлттық медицина университеті КЕАҚ, Қазақстан Республикасы, 050012, Алматы, Төле би көшесі, 94

³«Инноватор» ҒӨК» ЖШС, Қазақстан Республикасы, 010000, Астана, Каратал көшесі, 2)
Автор-корреспонденттің электрондық поштасы: nurmanovaakzharkyn@gmail.com*

Салауатты тамақтану мен функционалдық тағам өнімдеріне деген қызығушылықтың артуы жағдайында нан өнімдері функционалдық қасиеттерді мақсатты түрде қалыптастыру үшін перспективалы объект ретінде қарастырылуда. Қазіргі заманғы тағам технологияларының дамуы рецептураларды эмпирикалық іріктеуден нан өнімдерінің құрамын модельдеу мен оңтайландырудың ғылыми негізделген әдістеріне көшуді талап етеді. Осы шолу мақаласының мақсаты — берілген технологиялық, тағамдық және тұтынушылық қасиеттерге ие

функционалдық нан рецептураларын модельдеу мен оңтайландырудың заманауи тәсілдерін жүйелеу және талдау. Жұмыста функционалдық ингредиенттерді қолдануға, сондай-ақ рецептураларды модельдеудің математикалық есептеуі және data-driven әдістеріне байланысты зерттеулердің негізгі бағыттары қарастырылған. Зерттеудің ғылыми маңыздылығы функционалдық нан рецептураларын модельдеудің қазіргі заманғы әдістерін кеиенді түрде жинақтау және олардың артықшылықтары мен шектеулерін анықтаумен сипатталады. Практикалық маңыздылығы қарастырылған тәсілдерді болжамды қасиеттері мен тұрақты сапасы бар жаңа нан өнімдерін әзірлеу барысында қолдану мүмкіндігімен айқындалады. Зерттеу әдіснамасы халықаралық дерекқорларда индекстелген ғылыми жарияланымдарды талдау мен жалпылауға негізделген және жүйелік талдау, салыстырмалы талдау және жіктеу әдістерін қамтиды. Жүргізілген шолу нәтижесінде функционалдық нан рецептураларын модельдеу саласының дамуының негізгі үрдістері анықталды, сондай-ақ берілген функционалдық қасиеттерді қалыптастыруда математикалық оңтайландыру және компьютерлік модельдеу әдістерінің тиімділігі көрсетілді. Нан өнімдерін әзірлеу үдерістеріне цифрлық және интеллектуалдық технологияларды интеграциялаудың перспективалығы туралы қорытынды жасалды. Зерттеудің құндылығы функционалдық нан өнімдерін модельдеу саласындағы болашақ зерттеулерге арналған ғылыми негіз қалыптастыруында. Алынған нәтижелердің практикалық маңызы оларды ғылыми зерттеулерде, білім беру үдерісінде және нан-тоқаш өнеркәсібінде қолдану мүмкіндігімен анықталады.

Негізгі сөздер: функционалдық нан, рецептураларды модельдеу, оңтайландыру, функционалдық ингредиенттер, нан өнімдері, тағамдық құндылық.

MODELING AND OPTIMIZATION OF FUNCTIONAL BREAD FORMULATIONS: A COMPREHENSIVE REVIEW

¹A.D. NURMANOVA*, ²M.ZH. KIZATOVA, ³D.A. SHAIMERDENOVA, ¹A.B. ABUOVA

¹International Engineering Technological University, Kazakhstan, 050012, Almaty, Al-Farabi avenue, 93G/5

²Asfendiyarov Kazakh National Medical University, Kazakhstan, 050012, Almaty, Tole bi str., 94

³LLP “Innovator” Research and Production Enterprise, Kazakhstan, 010000, Astana, Karatal Street, 2)

Corresponding author’s e-mail: nurmanovaakzharkyn@gmail.com*

In the context of the growing interest in healthy nutrition and functional food products, bakery products are considered a promising object for the targeted formation of functional properties. The modern development of food technologies necessitates a transition from empirical recipe selection to scientifically grounded methods for modeling and optimizing the composition of bakery products. The aim of this review article is to systematize and analyze contemporary approaches to the modeling and optimization of functional bread formulations with predefined technological, nutritional, and consumer properties. The paper examines the main research directions related to the use of functional ingredients, as well as mathematical, computational, and data-driven methods for formulation modeling. The scientific significance of the study lies in the comprehensive generalization of modern methods for modeling functional bread formulations and in identifying their advantages and limitations. The practical significance is determined by the potential application of the reviewed approaches in the development of new bakery products with predictable properties and stable quality. The research methodology is based on the analysis and synthesis of scientific publications indexed in international databases, employing methods of system analysis, comparative analysis, and classification. As a result of the conducted review, key trends in the development of functional bread formulation modeling were identified, and the effectiveness of mathematical optimization and computer modeling methods in shaping targeted functional properties was demonstrated. A conclusion was drawn regarding the перспективность of integrating digital and intelligent technologies into bakery product development processes. The value of the study lies in establishing a scientific foundation for further research in the field of functional bakery product modeling. The practical relevance of the results consists in their applicability in scientific research, educational activities, and the baking industry.

Keywords: functional bread, formulation modeling, optimization, functional ingredients, bakery products, nutritional value

Введение

В последние десятилетия наблюдается устойчивый рост интереса к разработке функциональных продуктов питания, направленных на улучшение пищевого статуса населения и профилактику алиментарно-зависимых заболе-

ваний. В этом контексте хлебные изделия, являясь продуктами массового и ежедневного потребления, представляют собой перспективный объект для целенаправленного формирования функциональных свойств. Их рецептурный состав и технологические параметры

позволяют эффективно интегрировать функциональные ингредиенты без существенного изменения пищевых привычек потребителей [1, 2].

Несмотря на значительное количество исследований, посвящённых обогащению хлеба пищевыми волокнами, белковыми компонентами, витаминами, минеральными веществами и биологически активными соединениями, в большинстве случаев разработка рецептур по-прежнему основывается на эмпирическом подходе. Такой подход характеризуется высокой трудоёмкостью, ограниченной воспроизводимостью результатов и недостаточной предсказуемостью конечных свойств продукта [3]. В то же время усложнение рецептурного состава и ужесточение требований к качеству, безопасности и стабильности функциональных хлебных изделий обуславливают необходимость применения научно обоснованных методов моделирования и оптимизации [4].

Современные достижения в области математического моделирования, планирования эксперимента [5], компьютерных и data-driven технологий открывают новые возможности для рационального проектирования рецептур хлебных изделий с заданными функциональными, технологическими и потребительскими характеристиками. Однако анализ научной литературы показывает фрагментарность существующих исследований, отсутствие систематизированного обзора методов моделирования и недостаточную интеграцию полученных знаний в практику хлебопекарной промышленности [6]. Это формирует проблемную ситуацию, связанную с отсутствием единого методологического подхода к моделированию рецептур функционального хлеба.

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью обобщения и анализа современных научных подходов к моделированию и оптимизации рецептур функциональных хлебных изделий, а также выявления их потенциала и ограничений с точки зрения теории и практики пищевых технологий.

Объектом исследования являются функциональные хлебные изделия как продукты питания с заданными свойствами.

Предметом исследования являются методы и подходы к моделированию и оптимизации рецептур функционального хлеба.

Целью данной обзорной статьи является систематизация и анализ современных методов моделирования и оптимизации рецептур функционального хлеба с заданными технологи-

ческими, пищевыми и потребительскими характеристиками.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

– проанализировать современные представления о функциональных хлебных изделиях и их классификации;

– обобщить данные о функциональных ингредиентах, используемых при моделировании рецептур хлеба;

– рассмотреть основные подходы к математическому, компьютерному и data-driven моделированию рецептур;

– оценить методы оптимизации рецептур функционального хлеба с учётом многокритериальных ограничений;

– определить современные тенденции и перспективы развития данной области исследований.

В качестве методов исследования использованы анализ и обобщение научной литературы, системный и сравнительный анализ, классификация и синтез научных данных. Методологической основой работы послужили труды отечественных и зарубежных исследователей, опубликованные в рецензируемых научных изданиях.

Гипотеза исследования заключается в том, что применение комплексных методов моделирования и оптимизации позволяет повысить эффективность разработки функциональных хлебных изделий, обеспечивая прогнозируемость их свойств, стабильность качества и соответствие современным требованиям питания.

Научное и практическое значение настоящей работы состоит в формировании систематизированной базы знаний, которая может быть использована для дальнейших научных исследований, разработки инновационных хлебных изделий и внедрения современных цифровых технологий в хлебопекарную промышленность.

Материалы и методы

Материалом исследования послужили научные публикации, посвящённые разработке, моделированию и оптимизации рецептур функциональных хлебных изделий, индексируемые в международных базах данных Scopus и Web of Science. В анализ включены статьи, опубликованные преимущественно в период 2010–2024 гг., что обеспечивает актуальность и современный уровень рассматриваемых данных.

Общий массив проанализированных источников составил более 120 публикаций, из которых 65 научных статей были отобраны для

детального анализа на основании следующих критериев:

- наличие экспериментального или моделируемого подхода к разработке хлебных изделий;

- количественная оценка функциональных, технологических и/или потребительских показателей;

- применение методов математического, компьютерного или data-driven моделирования;

- публикация в рецензируемых журналах.

Современные зарубежные исследования демонстрируют, что добавление функциональных ингредиентов в хлебные изделия оказывает статистически значимое влияние как на пищевую ценность, так и на технологические характеристики продукта [7]. Так, Miranda et al. (2016) показали, что введение пищевых волокон в количестве 4–8 % от массы муки повышает общее содержание диетических волокон в хлебе на 25–60 %, однако приводит к снижению удельного объёма на 10–20 % и увеличению твёрдости мякиша [8]. Аналогичные результаты получены Dżiki et al. (2014), которые установили, что обогащение пшеничного хлеба антиоксидантсодержащими добавками улучшает антиоксидантную активность на 30–50 %, но требует корректировки водопоглощения теста для сохранения текстурных характеристик [9].

Фундаментальные исследования в области пищевой инженерии подчёркивают ограниченность эмпирического подхода при разработке сложных многокомпонентных рецептур. Van Boekel (2008) обосновал необходимость применения кинетического и регрессионного моделирования для прогнозирования качества пищевых продуктов, указав, что вариабельность экспериментальных данных без математической обработки может достигать 20–40 % [10]. Singh и Heldman (2014) показали, что использование математических моделей позволяет сократить число экспериментальных испытаний и повысить воспроизводимость результатов при масштабировании технологий [11].

Значительный вклад в развитие методов моделирования рецептур хлебных изделий внесли исследования Baş и Boyacı (2007), в которых применение Response Surface Methodology (RSM) и планов Box–Behnken и Central Composite Design позволило оптимизировать рецептуры при снижении количества экспериментов на 30–50 % [12]. Purlis (2019) продемонстрировал эффективность интеграции моделирования технологических параметров выпечки (температура 180–230 °С, время 20–40 мин) с показателями качества

хлеба, что позволило повысить стабильность объёмного выхода и текстуры готовых изделий [13].

В последние годы в литературе активно обсуждается применение методов машинного обучения для моделирования и оптимизации рецептур хлеба. Vevilacqua et al. (2020) показали, что использование искусственных нейронных сетей (ANN) позволяет прогнозировать текстурные характеристики хлеба с точностью $R^2 > 0,90$, превосходя традиционные регрессионные модели [14]. Zhu (2021) подчёркивает, что data-driven подходы открывают возможности многокритериальной оптимизации рецептур с учётом пищевой ценности, технологичности и сенсорных свойств, однако отмечает отсутствие унифицированных методологических схем их применения в хлебопекарной отрасли [15].

Анализ зарубежных исследований показывает, что количественные характеристики функциональных ингредиентов в рецептурах хлебных изделий варьируют в достаточно широких диапазонах, что отражает сложность обеспечения баланса между функциональностью и технологической пригодностью продукта. В работах Miranda et al. (2016) установлено, что содержание пищевых волокон в хлебных рецептурах, как правило, составляет от 2 до 12 % от массы муки [16]. При уровнях введения 2–4 % достигается умеренное повышение физиологической ценности без существенного ухудшения текстурных характеристик, тогда как при увеличении доли волокон до 8–12 % наблюдается значительное повышение общего содержания диетических волокон (до 60 %), сопровождающееся снижением удельного объёма хлеба и увеличением твёрдости мякиша. Эти данные подчёркивают необходимость применения методов моделирования для корректировки водопоглощения и структуры теста.

Белковые добавки, включая растительные белки бобовых культур и концентраты, в проанализированных исследованиях использовались в диапазоне 3–15 % от массы муки. Согласно данным Balestra и Coccì (2020), введение белковых компонентов на уровне 5–8 % способствует повышению содержания белка и улучшению аминокислотного профиля хлеба, однако при концентрациях выше 10–12 % отмечается ухудшение газодерживающей способности теста и снижение органолептической оценки продукта [17]. Это указывает на необходимость многокритериальной оптимизации рецептур с учётом как пищевой, так и технологической ценности.

Использование композитных мучных смесей, включающих цельнозерновую, бобовую и псевдозерновую муку, в зарубежных исследованиях варьировало в пределах 10–50 % замещения пшеничной муки. Dziki et al. (2014) показали, что замещение на уровне 10–30 % позволяет существенно повысить антиоксидантную активность и минеральный состав хлеба при сохранении приемлемых сенсорных характеристик [18]. В то же время увеличение доли замещения до 40–50 % требует обязательного изменения технологических параметров и применения корректирующих ингредиентов, что подчёркивает сложность разработки функциональных хлебных изделий без использования формализованных методов моделирования рецептур.

Таким образом, выявленные количественные диапазоны функциональных ингредиентов подтверждают необходимость перехода от эмпирического подбора рецептур к научно обоснованным методам моделирования и оптимизации, позволяющим учитывать нелинейные взаимосвязи между составом, технологическими параметрами и свойствами готового хлеба.

Методы и их исследования

Для обобщения и структурирования научной информации в настоящем исследовании применялись методы системного анализа, сравнительного анализа и классификации, которые являются общепринятыми при подготовке обзорных статей в области пищевых технологий и инженерии пищевых продуктов. Метод системного анализа использовался для рассмотрения хлебных изделий как многокомпонентных пищевых систем, в которых функциональные ингредиенты, технологические параметры и показатели качества находятся во взаимосвязанном и нелинейном взаимодействии. Такой подход позволил выявить причинно-следственные связи между составом рецептур и функциональными, технологическими и сенсорными свойствами хлеба.

Сравнительный анализ применялся для сопоставления результатов исследований зарубежных авторов по следующим параметрам: цели моделирования, используемые методы (эмпирические, математические, компьютерные, data-driven), входные переменные (доля функциональных ингредиентов, влажность теста, время ферментации, температура выпечки) и выходные показатели качества (объёмный выход, текстурные характеристики, пищевая и функциональная ценность). Такой подход соответствует методологии систематических и

интегративных обзоров, описанной Tranfield et al. (2003), и позволяет снизить субъективность интерпретации данных [19].

Применение указанных методов в совокупности обеспечило целостный и воспроизводимый характер анализа, позволив не только обобщить существующие научные данные, но и выявить методологические пробелы, которые дополняются в рамках настоящей обзорной статьи.

В анализируемых зарубежных исследованиях оценка качества и функциональных свойств хлебных изделий осуществлялась с использованием унифицированных международных и национальных стандартов, что обеспечивало сопоставимость и воспроизводимость полученных результатов. Влажность хлебных изделий определялась в соответствии со стандартом ISO 712:2009 (Cereals and cereal products — Determination of moisture content) и, как правило, находилась в диапазоне 35–45 % для пшеничного и функционального хлеба, при этом увеличение содержания функциональных ингредиентов требовало корректировки водопоглощения теста [20]. Кислотность мякиша оценивалась по ISO 7305:2019, что позволяло количественно характеризовать влияние заквасок и функциональных добавок на процессы ферментации и формирование вкусового профиля хлеба [21].

Объёмный выход хлеба, являющийся одним из ключевых показателей технологического качества, определялся согласно ААСС Method 10-05.01 и использовался как основной выходной параметр в моделях оптимизации рецептур [22]. В ряде исследований показано, что введение функциональных ингредиентов может снижать удельный объём на 10–25 %, что требует применения методов математического моделирования для компенсации негативных эффектов. Пористость мякиша оценивалась с использованием методов цифрового анализа изображений, позволяющих количественно определять размер, распределение и однородность пор, что широко применяется в современных исследованиях структуры хлеба.

Текстурные характеристики хлебных изделий, включая твёрдость, упругость и жевательность, определялись методом Texture Profile Analysis (TPA) в соответствии с ААСС Method 74-09.01, обеспечивающим количественную оценку механических свойств мякиша. Данные параметры широко используются как индикаторы потребительского восприятия качества хлеба и часто включаются в качестве целевых функций при многокритериальной оптимизации рецептур.

Пищевая ценность хлебных изделий в проанализированных работах рассчитывалась на основе стандартных методик АОАС (2016), включая определение содержания белков, жиров, углеводов и энергетической ценности. Функциональные свойства хлеба, такие как содержание пищевых волокон, антиоксидантная активность и гликемический индекс, оценивались с применением признанных аналитических методов. В частности, содержание пищевых волокон определялось по АОАС Method 985.29, который является эталонным методом для количественной оценки диетических волокон в зерновых продуктах [23]. Антиоксидантная активность в ряде исследований определялась методами DPPH и ABTS, а гликемический индекс — расчётным или экспериментальным путём с использованием стандартных протоколов, что позволяло объективно оценивать функциональную направленность хлебных изделий.

Применение стандартизированных методов оценки качества и функциональных свойств хлеба обеспечило достоверность сопоставления данных различных авторов и позволило использовать полученные показатели в качестве входных и выходных параметров при моделировании и оптимизации рецептур функционального хлеба.

Методы математического моделирования рецептур

Математическое моделирование рецептур хлебных изделий осуществлялось с применением:

- регрессионного анализа;
- метода отклика поверхности (Response Surface Methodology, RSM), описанного Ваş и Boyacı (2007) [24];
- планирования эксперимента типа Box–Behnken и Central Composite Design (CCD).

В качестве входных параметров моделей использовались количественные соотношения ингредиентов, влажность теста (50–65 %), время брожения (60–180 мин) и температура выпечки (180–230 °С). Выходными параметрами служили объём хлеба, текстурные показатели и функциональные характеристики.

Компьютерное и data-driven моделирование. Современные исследования включали применение методов машинного обучения, таких как:

- искусственные нейронные сети (ANN);
- методы опорных векторов (SVM);
- деревья решений.

Эти методы использовались для прогнозирования качества хлеба и оптимизации рецептур при многокритериальных ограниче-

ниях, что показано в работах Abdulwahab. 2021 [25].

Методы оптимизации рецептур. Оптимизация рецептур проводилась с использованием многокритериальных оптимизационных алгоритмов, учитывающих одновременно технологические, пищевые и сенсорные показатели. В качестве критериев оптимизации применялись:

- максимизация пищевой ценности;
- минимизация отклонений текстурных характеристик;
- соблюдение нормативных требований к качеству продукции.

Новизна применяемой методологии заключается в комплексном сравнительном анализе эмпирических, математических и интеллектуальных подходов к моделированию рецептур функционального хлеба с выделением универсальных и ограничивающих факторов их применения.

Обеспечение достоверности результатов. Достоверность выводов обеспечивалась:

- использованием проверенных стандартных методов анализа;
- сопоставлением результатов различных авторов;
- включением только рецензируемых источников;
- анализом количественных данных и воспроизводимых моделей.

Научная методология настоящего исследования основана на формулировании и последовательном решении комплекса исследовательских вопросов, направленных на выявление современных подходов к моделированию и оптимизации рецептур функциональных хлебных изделий с заданными свойствами. В рамках исследования анализировались вопросы, связанные с применяемыми методами моделирования, используемыми функциональными ингредиентами, целевыми технологическими, пищевыми и потребительскими показателями, а также с преимуществами и ограничениями существующих подходов. Особое внимание уделялось оценке степени прогнозируемости свойств функционального хлеба при использовании математических, компьютерных и data-driven методов моделирования.

Выдвигаемая гипотеза исследования заключается в том, что комплексное применение методов моделирования и оптимизации рецептур, основанных на современных математических и интеллектуальных подходах, позволяет повысить эффективность разработки функциональных хлебных изделий, обеспечивая

воспроизводимость и предсказуемость их свойств по сравнению с традиционными эмпирическими методами. Предполагается, что системный анализ и интеграция различных методологических подходов создают научную основу для рационального проектирования рецептур хлебных изделий с заданными функциональными характеристиками.

Исследование проведено в несколько последовательных этапов, включающих аналитический, систематизационный, методологический и обобщающий этапы. На начальном этапе осуществлялся сбор и критический анализ научных публикаций, посвящённых функциональным хлебным изделиям и методам моделирования рецептур. Далее выполнялась классификация функциональных ингредиентов, показателей качества и методов моделирования, применяемых в хлебопекарной промышленности. На следующем этапе проводился сравнительный анализ математических, компьютерных и data-driven методов моделирования и оптимизации рецептур, после чего формировались обобщающие выводы и перспективные направления дальнейших исследований.

В качестве методов исследования использовался комплекс общенаучных и специальных

методов, включающий анализ и обобщение научной литературы, системный и сравнительный анализ, классификацию, группировку и синтез научных данных. Методологической основой исследования послужили труды отечественных и зарубежных авторов в области пищевых технологий, математического моделирования и оптимизации рецептур функциональных продуктов питания. Такой подход обеспечил целостность исследования и сопоставимость анализируемых данных.

В результате проведённого исследования систематизированы современные научные подходы к моделированию рецептур функциональных хлебных изделий, выявлены ключевые группы функциональных ингредиентов и целевые показатели качества, а также определены наиболее эффективные методы математического и интеллектуального моделирования, применяемые для оптимизации рецептур. Полученные результаты позволили обосновать перспективность внедрения комплексных методов моделирования в процессы разработки функционального хлеба и определить направления дальнейших исследований в данной области, имеющие научную и практическую значимость.

Таблица 1. Показатели качества и функциональных свойств хлебных изделий, используемые в моделировании рецептур (обзор литературы)

Показатель	Стандарт / метод	Типичный диапазон значений	Назначение в моделировании
Влажность мякиша, %	ISO 712:2009	35–45	Входной параметр моделей реологии теста и текстуры хлеба
Кислотность	ISO 7305:2019	2,5–6,0	Индикатор ферментационных процессов и микробиологической активности
Удельный объём, см ³ /г	AACC 10-05.01	3,0–6,0	Основная целевая функция оптимизации рецептур
Пористость мякиша, %	Цифровой анализ изображений	55–80	Выходной параметр структурных моделей
Твёрдость мякиша, Н	AACC 74-09.01 (TPA)	2–10	Ограничение при оптимизации сенсорных свойств
Упругость мякиша	AACC 74-09.01 (TPA)	0,60–0,90	Сенсорный критерий в многокритериальных моделях
Пищевые волокна, %	AOAC 985.29	2–12	Ключевой функциональный целевой показатель
Антиоксидантная активность	DPPH / ABTS	+30–50 % к контролю	Функциональный выход модели

В рамках настоящего комплексного обзора указанные показатели рассматриваются не как результаты собственного эксперимента, а как наиболее часто используемые количественные параметры, применяемые зарубежными авторами при моделировании и оптимизации рецептур функциональных хлебных изделий. Их включение в анализ обусловлено тем, что именно эти показатели формируют основу большинства математических, регрессионных и интеллектуальных моделей, описанных в современной научной литературе.

Технологические показатели, такие как влажность и кислотность, в большинстве исследований используются в качестве входных переменных моделей, поскольку они напрямую зависят от состава рецептуры и режимов технологической обработки. Структурно-механические характеристики хлеба, включая удельный объём, пористость и текстурные параметры, рассматриваются авторами как ключевые выходные параметры моделирования, отражающие качество и потребительские свойства продукта.

Функциональные показатели, в том числе содержание пищевых волокон, антиоксидантная активность и гликемический индекс, в литературе чаще всего выступают в роли целевых функций оптимизации, определяющих функциональную направленность хлебных изделий. При этом анализ зарубежных работ показывает, что данные показатели редко оптимизируются изолированно и, как правило, включаются в многокритериальные модели, учитывающие компромисс между

функциональной ценностью и технологической пригодностью продукта.

Таким образом, в рамках обзорного исследования моделирование рецептур функционального хлеба рассматривается как инструмент интеграции разрозненных экспериментальных данных, полученных различными авторами, в единую методологическую систему. Это позволяет выявить общие закономерности, ограничения и перспективные направления развития моделирования и оптимизации рецептур, что формирует научную основу для дальнейших прикладных исследований.

Результаты и их обсуждение

В результате проведённого комплексного анализа зарубежных научных публикаций выявлены устойчивые закономерности и противоречия в подходах к моделированию и оптимизации рецептур функциональных хлебных изделий. Сопоставление данных различных авторов позволило не только обобщить количественные диапазоны использования функциональных ингредиентов и применяемые методы моделирования, но и выявить их методологические ограничения, связанные с фрагментарностью исследований и отсутствием единой концепции проектирования рецептур. Для наглядного представления и аналитической интерпретации полученных результатов ключевые аспекты моделирования рецептур функционального хлеба, выявленные в ходе настоящего обзорного исследования, систематизированы и представлены в таблице 2.

Таблица 2. Обобщённые результаты анализа моделирования рецептур функционального хлеба и их интерпретация

Анализируемый аспект	Результаты, выявленные в ходе обзора	Сопоставление с предыдущими исследованиями	Интерпретация и вывод автора
Количественные диапазоны функциональных ингредиентов	Пищевые волокна: 2–12 %; белковые добавки: 3–15 %; композитные смеси: 10–50 %	Miranda et al. (2016); Dziki et al. (2014) приводят схожие диапазоны, но без системного анализа	Диапазоны носят эмпирический характер и требуют формализации через моделирование
Влияние ингредиентов на структуру хлеба	↓ удельный объём на 10–25 %, ↑ твёрдость мякиша в 1,5–2 раза при превышении порогов	Подтверждено в ряде экспериментальных работ	Выявлена необходимость многокритериальной оптимизации рецептур
Доминирующие методы моделирования	Регрессия и RSM	Vaş & Boyacı (2007) подтверждают эффективность RSM	Методы эффективны, но ограничены локальной оптимизацией
Применение интеллектуальных методов	ANN, ML с $R^2 > 0,90$	Bevilacqua et al. (2020); Zhu (2021)	Высокая точность, но низкая степень методологической стандартизации
Целевые функции оптимизации	Удельный объём и текстура доминируют	В большинстве работ функциональные показатели вторичны	Требуется равноправное включение функциональных и технологических критериев
Методологические ограничения	Отсутствие единой концепции	Разрозненность подходов в литературе	Обоснована необходимость интегративной методологии

Данные, представленные в таблице 2, отражают ключевые результаты, полученные в ходе настоящего обзорного исследования, и позволяют систематизировать разрозненные выводы зарубежных авторов в единую аналитическую структуру. Анализ количественных диапазонов функциональных ингредиентов показывает, что, несмотря на их широкое использование в литературе, указанные значения не сопровождаются единым методологическим обоснованием и зачастую определяются экспериментально, без применения формализованных моделей.

Сопоставление результатов различных исследований выявило устойчивую закономерность ухудшения структурно-механических характеристик хлеба при превышении определённых концентраций функциональных ингредиентов. В отличие от предыдущих работ, в которых данные эффекты рассматривались фрагментарно, в рамках настоящего обзора они проанализированы с позиции необходимости многокритериальной оптимизации, учитывающей одновременно функциональную ценность и технологическую пригодность продукта.

Анализ применяемых методов моделирования показал, что, несмотря на широкое использование регрессионных моделей и методов отклика поверхности, их возможности ограничены локальной оптимизацией и не всегда позволяют учитывать сложные нелинейные взаимодействия факторов. Интеллектуальные методы моделирования демонстрируют более высокую точность прогнозирования, однако отсутствие стандартизированных методологических подходов ограничивает их практическое применение, что подчёркивается и в предыдущих исследованиях.

Таким образом, представленная таблица не только обобщает результаты зарубежных исследований, но и отражает авторскую позицию, заключающуюся в необходимости перехода от разрозненных методов моделирования к интегрированной методологической системе проектирования рецептур функционального хлеба. Это положение является ключевым результатом и научным выводом настоящего комплексного обзора.

Сравнительный анализ данных литературы свидетельствует о том, что увеличение содержания функциональных ингредиентов, прежде всего пищевых волокон и белковых добавок, приводит к статистически значимому росту пищевой и физиологической ценности хлебных изделий. В то же время в большинстве работ отмечается ухудшение структурно-механи-

ческих показателей: снижение удельного объёма на 10–25 % и увеличение твёрдости мякиша в 1,5–2 раза при превышении пороговых концентраций функциональных компонентов. Эти результаты согласуются с выводами Miranda et al. (2016) и Dziki et al. (2014), однако проведённый обзор показывает, что в ряде исследований данные эффекты анализируются изолированно, без учёта совокупного влияния рецептурных и технологических факторов.

Полученные в ходе обзора результаты позволяют сделать вывод о том, что количественные диапазоны использования функциональных ингредиентов, представленные в литературе, носят эмпирический характер и существенно варьируют в зависимости от используемых методов оценки и целей исследования. В отличие от предыдущих работ, в настоящем обзоре данные диапазоны проанализированы с позиции их роли в моделировании рецептур, что позволило выделить критические значения ингредиентов, при которых требуется обязательное применение методов оптимизации.

Анализ методов моделирования, применяемых в рассмотренных исследованиях, показал, что доминирующее положение по-прежнему занимают регрессионные модели и методы отклика поверхности. Эти подходы обеспечивают формализацию влияния факторов и сокращение экспериментальных затрат, что подтверждается результатами Ваş и Воуасі (2007). Вместе с тем сравнение с более поздними исследованиями выявило, что интеллектуальные data-driven методы, включая искусственные нейронные сети, демонстрируют более высокую точность прогнозирования свойств хлебных изделий ($R^2 > 0,90$), как показано Bevilacqua et al. (2020). Однако обсуждение этих работ в рамках настоящего обзора выявило отсутствие унифицированных критериев оценки эффективности моделей и ограниченность их промышленной апробации.

Сопоставление результатов различных авторов позволило установить, что в большинстве исследований оптимизация рецептур осуществляется по одному или двум показателям, чаще всего по удельному объёму или текстуре хлеба. При этом функциональные показатели нередко рассматриваются как вторичные. Полученные в ходе обзора результаты указывают на необходимость перехода к многокритериальной оптимизации, в которой функциональные, технологические и сенсорные показатели рассматриваются как равнозначные целевые функции. Данный вывод расширяет и

дополняет ранее опубликованные исследования, в которых комплексный подход к оптимизации рецептур функционального хлеба практически не реализован.

Таким образом, результаты настоящего обзорного исследования показывают, что существующие научные работы создают значительный задел в области функционализации хлебных изделий, однако их разрозненность и методологическая неоднородность ограничивают возможность формирования универсальных моделей рецептур. Проведённый анализ и обсуждение позволяют обосновать необходимость интеграции эмпирических данных, математического моделирования и интеллектуальных методов в рамках единой методологической концепции, что представляет собой основной научный вывод и вклад данной работы по сравнению с предыдущими исследованиями.

Заключение

В результате проведённого комплексного обзора зарубежных научных публикаций сформировано целостное представление о современном состоянии исследований в области моделирования и оптимизации рецептур функциональных хлебных изделий. Установлено, что, несмотря на значительный объём накопленных экспериментальных данных, большинство исследований носит фрагментарный характер и ориентировано на решение частных задач, связанных с использованием отдельных функциональных ингредиентов или ограниченного набора показателей качества.

Проведённый анализ показал, что количественные диапазоны применения пищевых волокон, белковых добавок и композитных мучных смесей, широко представленные в литературе, в основном определяются эмпирически и существенно варьируют в зависимости от целей и методологии конкретных исследований. Это ограничивает воспроизводимость результатов и их практическую применимость, особенно при переходе от лабораторных условий к промышленному производству. В отличие от большинства предыдущих работ, в настоящем обзоре данные диапазоны рассмотрены с позиции их роли в моделировании рецептур и необходимости формализации через методы оптимизации.

Сопоставление используемых в литературе методов моделирования показало, что регрессионные модели и методы отклика поверхности остаются наиболее распространёнными инструментами проектирования рецептур функционального хлеба. Вместе с тем выявлено,

что интеллектуальные data-driven подходы обладают более высоким прогностическим потенциалом, однако их внедрение сдерживается отсутствием единых методологических принципов и критериев оценки эффективности моделей. Данный вывод подчёркивает необходимость интеграции традиционных и интеллектуальных методов в рамках единой концепции моделирования.

Основным научным выводом настоящего комплексного обзора является обоснование необходимости перехода от разрозненных эмпирических и локальных моделей к системному, многокритериальному подходу к моделированию рецептур функционального хлеба. Такой подход должен учитывать одновременно функциональные, технологические и сенсорные свойства хлебных изделий, а также требования воспроизводимости и масштабируемости результатов.

Практическая значимость полученных выводов заключается в возможности их использования в качестве методологической основы для дальнейших научных исследований, разработки оптимальных моделей рецептур функционального хлеба и внедрения цифровых инструментов проектирования в хлебопекарной промышленности. Полученные результаты формируют научную базу для развития интегрированных моделей рецептур хлебных изделий с заданными функциональными свойствами и подтверждают актуальность выбранного направления моделирования рецептур функционального хлеба и их интерпретации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Siro, I., E. Kapolna, B. Kapolna, and A. Lugasi. 2008. "Functional Food: Product Development, Marketing and Consumer Acceptance." *Appetite* 51 (3): 456–467.
2. Jones, P. J., and S. Jew. 2007. "Functional Food Development: Concept to Reality." *Trends in Food Science & Technology* 18 (7): 387–390.
3. Bigliardi, B., and F. Galati. 2013. "Innovation Trends in the Food Industry: The Case of Functional Foods." *Trends in Food Science & Technology* 31 (2): 118–129.
4. Purlis, E. 2019. "Baking Process Design Based on Modelling and Simulation: Toward Optimization of Bread Quality." *Food Control* 100: 45–52.
5. Singh, R. P., and D. R. Heldman. 2014. *Introduction to Food Engineering*. Academic Press, 37–48.
6. Aguilera, J. M. 2018. "Relating Food Engineering to Cooking and Gastronomy: Modeling, Simulation, and Visualization." *Annual Review of Food Science and Technology* 9: 191–210.
7. Siro, I., E. Kapolna, B. Kapolna, and A. Lugasi. 2008. "Functional Food: Product Development, Marketing and Consumer Acceptance." *Appetite* 51 (3): 456–467.

8. Miranda, J., et al. 2016. "Nutritional Enhancement of Bread with Functional Ingredients: A Review." *Food Research International* 80: 1–17.
9. Dziki, D., R. Różyło, U. Gawlik-Dziki, and M. Świeca. 2014. "Current Trends in the Enhancement of Antioxidant Activity of Wheat Bread." *Journal of Food Science and Technology* 51: 423–434.
10. Van Boekel, M. A. J. S. 2008. "Kinetic Modeling of Food Quality: A Critical Review." *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 7 (2): 144–158.
11. Singh, R. P., and D. R. Heldman. 2014. *Introduction to Food Engineering*. Academic Press.
12. Baş, D., and İ. H. Boyacı. 2007. "Modeling and Optimization I: Usability of Response Surface Methodology." *Journal of Food Engineering* 78 (3): 836–845.
13. Purlis, E. 2019. "Baking Process Design Based on Modelling and Simulation: Toward Optimization of Bread Quality." *Food Control* 100: 45–52.
14. Bevilacqua, M., et al. 2020. "Artificial Intelligence Applications in Food Process Modeling." *Journal of Food Engineering* 287: 110126.
15. Zhu, F. 2021. "Applications of Machine Learning in Food Science and Technology." *Food Chemistry* 342: 128199.
16. Miranda, J., et al. 2016. "Nutritional Enhancement of Bread with Functional Ingredients: A Review." *Food Research International* 80: 1–17.
17. Balestra, F., and E. Cocci. 2020. "Functional Bakery Products: Trends and Challenges." *Journal of Cereal Science* 93.
18. Dziki, D., R. Różyło, U. Gawlik-Dziki, and M. Świeca. 2014. "Current Trends in the Enhancement of Antioxidant Activity of Wheat Bread." *Journal of Food Science and Technology* 51: 423–434.
19. Tranfield, D., D. Denyer, and P. Smart. 2003. "Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review." *British Journal of Management* 14 (3): 207–222.
20. ISO. 2009. *ISO 712: Cereals and Cereal Products — Determination of Moisture Content*. Geneva: International Organization for Standardization.
21. ISO. 2019. *ISO 7305: Milled Cereal Products — Determination of Acidity*. Geneva: International Organization for Standardization.
22. AACC International. 2010–2019. *Approved Methods of Analysis*. 11th ed. Methods 10-05.01; 74-09.01. St. Paul, MN.
23. AOAC International. 2016. *Official Methods of Analysis*. 20th ed. Method 985.29. Gaithersburg, MD.
24. Baş, D., and İ. H. Boyacı. 2007. "Modeling and Optimization I: Usability of Response Surface Methodology." *Journal of Food Engineering* 78: 836–845.
25. Ali, Zainab N., Iman Askerzade, and Saddam Abdulwahab. 2021. "Estimation Model for Bread Quality Proficiency Using Fuzzy Weighted Relevance Vector Machine Classifier." *Applied Bionics and Biomechanics* 2021 (February 26): 6670316.