

Научная статья
УДК 664.641.4
EDN: КОКОКТ
DOI: 10.21285/achb.1019



Проектирование состава композитной обогащенной мучной смеси и изучение ее свойств

О.Н. Мусина✉, А.С. Захарова, С.И. Конева

Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова,
Барнаул, Российская Федерация

Аннотация. Целью проведенного исследования являлось проектирование состава композитной мучной смеси на основе пшеничной муки, изучение ее физико-химических, биохимических и реологических свойств. С помощью полного трехфакторного эксперимента обоснован состав композитной мучной смеси: псиллиум – 4,5%, перга пчелиная – от 3,2 до 4,2%, порошок клюквы – от 3,5 до 3,7%, мука пшеничная – остальное. При этом критерии оптимальности составляют: число падения по Хагбергу – Пертену, характеризующее активность α -амилазы – 268 с, кислотность – 10 град., водопоглотительная способность – 65%. Композитная мучная смесь характеризуется (в расчете на 100 г) высоким содержанием следующих компонентов: пищевых волокон – 8,1 г, витамина Е – 8,1 мг ток. экв., β -каротина – 4,3 мг, витамина В1 – 0,35 мг, железа – 2,7 мг. Изучены свойства контрольного (пшеничная мука) и опытного (композитная мучная смесь, включающая: псиллиум – 4,5%, пергу пчелиную – 3,8%, порошок клюквы – 3,6%, муку пшеничную – остальное) образцов. Исследования проведены на приборе Mixolab. Установлено, что псиллиум, клюква и пчелиная перга влияют на состояние белково-протеиназного и углеводно-амилазного комплексов мучной смеси, повышают водопоглощение теста на 14,5%, удлиняют время образования теста до 8,1 мин, повышают растворимость глиадиновой и глютелиновой фракции, придают тесту высокую растяжимость, снижают температуру клейстеризации крахмала на 1,9 °С, амилолитическую активность на 9% и дают высокую стабильность крахмального клейстера (момент силы 1,300 Н×м). Композитная мучная смесь перспективна в качестве полуфабриката продукции повышенной пищевой ценности.

Ключевые слова: композитная мучная смесь, псиллиум, клюква, перга пчелиная, биохимические свойства, реологические свойства

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-03-2024-105, номер темы FZMM-2024-0003, рег. № НИОКТР 124013000666-5).

Для цитирования: Мусина О.Н., Захарова А.С., Конева С.И. Проектирование состава композитной обогащенной мучной смеси и изучение ее свойств // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2026. Т. 16. N 1. С. 82–91. DOI: 10.21285/achb.1019. EDN: КОКОКТ.

PHYSICOCHEMICAL BIOLOGY

Original article

Formulation and functional properties of an enriched composite flour blend

Olga N. Musina✉, Alexandra S. Zakharova, Svetlana I. Koneva

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russian Federation

Abstract. This study aimed to develop and characterize a composite flour blend based on wheat flour, focusing on its physical, chemical, biochemical, and rheological properties. A full factorial design with three factors was used to determine the optimal formulation, which included 4.5% psyllium, 3.2–4.2% bee bread, 3.5–3.7% cranberry

powder, and the remainder wheat flour. The optimality criteria were as follows: a Hagberg – Perten falling number of 268 s, reflecting α -amylase activity; titratable acidity of 10°; and water absorption of 65%. Per 100 g of product, the composite flour blend contained high levels of dietary fiber (8.1 g), vitamin E (8.1 mg tocopherol equivalents), β -carotene (4.3 mg), vitamin B1 (0.35 mg), and iron (2.7 mg). The properties of the control sample (wheat flour) and the experimental sample (composite flour blend containing 4.5% psyllium, 3.8% bee bread, 3.6% cranberry powder, and the remainder wheat flour) were evaluated using a Mixolab instrument. Psyllium, cranberry, and bee bread modified the protein – proteinase and carbohydrate – amylase complexes of the flour blend, increased dough water absorption by 14.5%, extended dough development time to 8.1 min, and enhanced the solubility of gliadin and glutenin fractions. The composite blend also imparted high dough extensibility, reduced starch gelatinization temperature by 1.9 °C, decreased amylolytic activity by 9%, and produced a starch paste with high stability (torque 1.300 N×m). Overall, the composite flour blend shows strong potential as a semifinished ingredient for foods with enhanced nutritional value.

Keywords: composite flour blend, psyllium, cranberry, bee bread, biochemical properties, rheological properties

Funding. The Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation supported this work (project no. 075-03-2024-105, FZMM-2024-0003, 124013000666-5).

For citation: Musina O.N., Zakharova A.S., Koneva S.I. Formulation and functional properties of an enriched composite flour blend. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2026;16(1):82-91. (In Russian). DOI: 10.21285/achb.1019. EDN: КОКОКТ.

ВВЕДЕНИЕ

В Арктической зоне Российской Федерации проживает около 2,6 млн человек, что составляет более половины всех жителей мировой Арктики. По итогам 2023 года Росстат опубликовал данные, согласно которым в регионах Арктики потребление хлебопродуктов довольно велико и составляет 56–132 кг в год на душу населения. Следовательно, композитные смеси на основе пшеничной муки являются хорошим прототипом для разработки обогащенной продукции.

Над созданием обогащенных композитных мучных смесей работают отечественные и зарубежные ученые. Среди них Е.П. Мелешкина, С.Н. Коломиец, Е.В. Шакалова, О.Н. Воропаева, Н.В. Сокол, А.Б. Абуова, К. Гонсалес-Галеана, А. Кастаньеда-Салазар, Э. Эван-Печ, Л. Чель-Герреро, Р.У. Окроспома-Дуэньяс, К. Таленс, М. Лаго и многие другие [1–6].

В нашем исследовании в качестве источника эссенциальных компонентов для обогащения композитной мучной смеси на основе пшеницы (*Triticum aestivum* L.) выбраны перга пчелиная (*Ambrosia apis*), оболочка семян подорожника (*Plantago psyllium*) и клюква (*Vaccinium oxycoccos*).

Химический состав перги хорошо изучен [7–11]: перга пчелиная (*Ambrosia apis*) – ценный источник биологически активных веществ, в том числе витаминов (ретинол, кальциферол, токоферол, аскорбиновая кислота, витамины группы В, биотин, рутин и др.); перга содержит около 22,5% полноценного по аминокислотному составу белка, 28 минеральных элементов (кальций, фосфор, калий, железо, цинк, марганец и т.д.); среди липидов перги отмечается высокое содержание фосфолипидов и фитостероинов (до 1,6%). Для нашего исследования выбрана именно перга, поскольку за счет высокой ферментативной активности она содержит достаточно много молочной кислоты (до 3,2%), что предположительно будет способствовать интенсификации биохимических и коллоидных процессов при созревании теста.

Псиллиум представляет собой оболочку семян подорожника (*Plantago psyllium*), применяется в медицине для улучшения перистальтики желудочно-кишечного тракта, снижения гликемического индекса, минимизации риска сердечно-сосудистых заболеваний, стимуляции роста полезной микрофлоры и др. [12–14]. В нашем исследовании псиллиум выбран в качестве источника пищевых волокон, содержание которых достигает 85%, причем 70% пищевых волокон псиллиума являются растворимыми и при взаимодействии с водой образуют гели [15, 16].

Среди дикорастущих ягод по объемам промышленных заготовок и пищевой ценности лидирует клюква (*Vaccinium oxycoccos*). Клюква произрастает в холодных и умеренных климатических зонах, культивируется на территории Российской Федерации, в том числе в Арктической зоне. Ягодные порошки, полученные путем сублимационной сушки, позволяют сохранить ценные свойства сырья и обеспечить удобство доставки, хранения, дозирования [17, 18]. Химический состав клюквы отличается высоким содержанием витаминов С, В1, В2, В5, В6, РР, К, микро- и макроэлементов, биологически активных веществ (флавоноидов, тритерпеновых кислот и т.д.). Клюква богата органическими кислотами (лимонная, яблочная, бензойная, янтарная и др.), перспективна в качестве обогащающей добавки, красителя и вкусо-ароматического компонента [19, 20].

Следует отметить, что выбранные источники эссенциальных веществ имеют существенно отличающийся от пшеницы химический состав, биохимические и физико-химические свойства и могут существенно отразиться на свойствах обогащенной композитной мучной смеси. Необходимо изучить, как повлияют новые компоненты мучной смеси на биотехнологические процессы, протекающие при смешивании сырья, замесе теста и его созревании.

В связи с вышесказанным нам представляется актуальной проверка гипотезы о том, что включение

¹ Потребление основных продуктов питания населением Российской Федерации // Федеральная служба государственной статистики. Режим доступа: <https://www.rosstat.gov.ru/compendium/document/13278> (дата обращения: 03.03.2026).

в состав мучной пшеничной смеси псиллиума, клюквы и пчелиной перги приведет к выраженным изменениям в биохимических и структурно-механических свойствах смеси. Цель проведенного исследования заключалась в изучении физико-химических, биохимических и реологических свойств спроектированной обогащенной композитной мучной смеси и оценке перспектив ее использования в производстве пищевой продукции.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследования проводились на базе Центра комплексных исследований и экспертной оценки пищевой продукции «АлтайБиоЛакт» Алтайского государственного технического университета имени И.И. Ползунова (г. Барнаул, Россия).

Объектами исследования, соответствующими требованиям действующей нормативной документации, стали:

- композитные мучные смеси (КМС) на основе муки пшеничной, псиллиума, перги пчелиной и клюквы;
- тесто, полученное из муки пшеничной (контрольный образец), и тесто, полученное из спроектированной КМС (опытный образец).

Для получения КМС использована пшеница (*Triticum aestivum* L.) в виде муки пшеничной хлебопекарной первого сорта под торговым наименованием «Алейка» (далее по тексту – мука пшеничная); псиллиум (*Plantago psyllium*) под торговым наименованием «Миофарм» (далее по тексту – псиллиум); перга пчелиная (*Ambrosia apis*) под торговым наименованием «Нектар Алтай», предварительно измельченная до крупности не более 200 мкм (далее по тексту – перга пчелиная); клюква (*Vaccinium oxococcos*) под торговым наименованием Frombio, предварительно сублимированная и измельченная до крупности не более 200 мкм (далее по тексту – порошок клюквы).

Поскольку при составлении композитных мучных смесей большой вклад вносят характеристики основного сырья – муки пшеничной, установлены ее хлебопекарные свойства: цвет – белый с желтоватым оттенком; влажность – $12,3 \pm 0,2\%$; белизна – $48,0 \pm 0,3$ у.е. РЗ-БПЛ; количество клейковины – $30,0 \pm 1,0\%$; качество клейковины – $75,0 \pm 2,0$ у.е.; число падения – 280 ± 9 с; крупность помола: остаток на сите из шелковой ткани № 35 – $0,8 \pm 0,5$, проход через сито из шелковой ткани № 43 – $85,0 \pm 2,0\%$; водопоглотительная способность – $54,0 \pm 1,5\%$; кислотность – $1,7 \pm 0,2$ град. Влажность используемого образца псиллиума составляла $5,0 \pm 0,1\%$, порошка клюквы – $12,0 \pm 0,2\%$, перги – $5,0 \pm 0,1\%$.

Состав КМС, обогащенной апипродуктами (перга пчелиная), спроектирован на основе методов математического моделирования путем реализации полного трехфакторного эксперимента ПФЭ 2³.

Критерии оптимальности: Y_1 – число падения, с; Y_2 – кислотность, град.; Y_3 – водопоглотительная способность, %.

Исследовано совместное влияние трех факторов: x_1 – содержание в КМС перги пчелиной, %; x_2 – содержание в КМС псиллиума, %; x_3 – содержание в КМС порошка клюквы, %. Перга пчелиная, псиллиум и клюква вносились в смесь взамен части муки пшеничной.

Уровни варьирования факторов: перга пчелиная – от 2 до 6%, псиллиум – от 3 до 9%, порошок клюквы – от 1 до 7%. Уровни варьирования факторов основаны на результатах предварительных экспериментов по изучению минорного влияния каждого исследуемого компонента (перга, псиллиум, клюква) на качество КМС на основе муки пшеничной [21, 22].

Выбор компонентов КМС был проведен с учетом их технологической и органолептической совместимости. Перга содержит молочную кислоту, клюква – лимонную, яблочную и бензойную. При совместном использовании они создадут буферную систему, что будет способствовать стабилизации белкового каркаса теста, снижению активности амилотических ферментов, ингибированию роста патогенной микрофлоры. Взаимодействие пищевых волокон псиллиума и пектинов клюквы формирует структуру геля, которая стабилизирует воду в тесте и создаст барьер против миграции влаги в готовом изделии. Пчелиная перга в указанных концентрациях имеет нейтральный вкус и запах. Псиллиум в целом не имеет выраженного вкуса и запаха. Клюква – традиционный компонент пищевой продукции, в том числе изделий на основе пшеничной муки. Выбранные компоненты потенциально способны увеличить сроки годности пищевой продукции. Бензойная кислота, содержащаяся в клюкве, является натуральным консервантом, подавляющим развитие дрожжей и плесеней. Пищевые волокна и органические кислоты псиллиума и клюквы создают неблагоприятную среду для развития микроорганизмов. Антиоксидантные свойства перги (витамин Е, каротиноиды) и клюквы (антоцианы, флавоноиды) замедляют окислительные процессы в готовых изделиях. В научной литературе [12, 13, 17] показано, что включение псиллиума и клюквы в состав пищевой продукции увеличивает сроки годности.

Для обработки результатов полного факторного эксперимента ПФЭ 2³ использовано композиционное ортогональное планирование. Статистический анализ значимости коэффициентов регрессии проведен по критерию Фишера.

Для оценки физико-химических, биохимических и реологических свойств контрольного и опытного образцов КМС проведен ряд исследований.

Число падения, характеризующее активность α -амилазы в КМС, определяли по вязкости водно-мучной суспензии методом Хагберга – Пертена согласно ГОСТ ISO 3093-2016² (идентичен международному стандарту ISO 3093:2009)³.

Кислотность КМС оценивали в соответствии с ГОСТ 27493-87⁴ со следующей модификацией: окончание титрования определяли с помощью рН-метра, поскольку

² ГОСТ ISO 3093-2016. Зерно и продукты его переработки. Определение числа падения методом Хагберга – Пертена. М.: Стандартиформ, 2016. 16 с.

³ ISO 3093:2009. Wheat, rye and their flours, durum wheat and durum wheat semolina – Determination of the falling number according to Hagberg-Perten. Geneva, 2009. 10 p.

⁴ ГОСТ 27493-87. Мука и отруби. Метод определения кислотности по болтушке. М.: Стандартиформ, 2007. 4 с.

исследуемые КМС имели розовый цвет, интенсивность которого пропорциональна количеству вносимого порошка клюквы.

Водопоглотительная способность КМС при постановке полного трехфакторного эксперимента изучалась согласно методике, изложенной в ГОСТ ISO 5530-1-2013⁵ (идентичен международному стандарту ISO 5530-1:1997)⁶.

Характеристика углеводно-амилазного комплекса, обусловленного свойствами крахмала и соотношением в нем фракций амилозы и амилопектина, исследована по ГОСТ ISO 17718-2015⁷ (идентичен международному стандарту ISO 17718:2013)⁸, при этом реологические свойства теста, полученного на основе спроектированной КМС, изучали на приборе Mixolab (Mixolab Chopin Technologies, Франция) с использованием режима для теста из пшеничной муки и протокола Chopin+.

Статистическая обработка экспериментальных данных проводилась в программном обеспечении Microsoft Excel.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате реализации полного факторного эксперимента по изучению совместного влияния перги пчелиной, псиллиума и клюквы на число падения по Хагбергу – Пертену получено уравнение регрессии, адекватно описывающее экспериментальные данные:

$$Y_1 = 269,56 - 5,81 \times x_1 + 19,44 \times x_2 + 10,06 \times x_3 - 3,94 \times x_1 \times x_2 + 4,94 \times x_2 \times x_3 + 4,44 \times x_1 \times x_3 - 4,69 \times x_1 \times x_2 \times x_3. \quad (1)$$

Для кислотности и водопоглотительной способности КМС получены адекватно описывающие экспериментальные данные уравнения регрессии (2) и (3) соответственно:

$$Y_2 = 11,4 + 0,55 \times x_1 - 0,19 \times x_2 + 4,41 \times x_3 + 0,79 \times x_1 \times x_2 - 0,15 \times x_2 \times x_3 - 0,56 \times x_1 \times x_3 + 0,65 \times x_1 \times x_2 \times x_3; \quad (2)$$

$$Y_3 = 53,913 - 0,4625 \times x_1 - 1,663 \times x_3 + 0,338 \times x_2 \times x_3 + 0,213 \times x_1 \times x_3 - 0,288 \times x_1 \times x_2 \times x_3. \quad (3)$$

Совместное решение уравнений (1), (2) и (3) позволило установить оптимальное соотношение компонентов в КМС: псиллиум – 4,5%, перга пчелиная – от 3,2 до 4,2%, порошок клюквы – от 3,5 до 3,7%, мука пшеничная – остальное. При этом критерии оптимальности, характеризующие качество КМС, составляют: число падения – 268 с, кислотность – 10 град., водопоглотительная способность – 65%.

Расчетным путем определены показатели пищевой ценности разработанной КМС (на 100 г): белки – 10 г, жиры – 1,5 г, углеводы – 65 г, энергетическая ценность – 310 ккал (1297 кДж), витамин В2 – 0,1 мг, витамин В9 – 385 мкг, витамин В6 – 0,2 мг, витамин РР – 2 мг, биотин – 5,5 мкг. Оценка свойств спроектированной КМС (расчетным путем) позволила установить, что смесь характеризуется высоким содержанием следующих нутриентов: пищевые волокна – 8,1 г / 100 г (норма по ГОСТ Р 55577-2013⁹ – не менее 6 г / 100 г), витамин Е – 8,1 мг ток. экв. / 100 г (54% от суточной потребности взрослого человека), β -каротин – 4,3 мг / 100 г (86% от суточной потребности). Она также является источником витамина В1 – 0,35 мг / 100 г (23% от суточной потребности) и железа – 2,7 мг / 100 г (27% от суточной потребности). Такие характеристики позволяют отнести спроектированную КМС к перспективным полуфабрикатам для производства продукции повышенной пищевой ценности. Следует отметить, что минеральные вещества, включая железо, а также пищевые волокна достаточно стабильны при термической обработке, тиамин умеренно термочувствителен, а витамин Е и β -каротин – термолабильны. Возможность отнесения готовой продукции на основе КМС к функциональным продуктам согласно ГОСТ Р 55577-2013 требует дополнительной оценки.

Для изучения биохимических и реологических свойств теста была подготовлена согласно области оптимальных значений КМС, включающая псиллиум – 4,5%, пергу пчелиную – 3,8%, порошок клюквы – 3,6%, муку пшеничную – остальное.

Реологические свойства теста (водопоглотительная способность, время образования и консистенция теста, его стабильность и вязкость при замесе) обусловлены состоянием белков и протеолитических ферментов, а также биохимическими и коллоидными изменениями, происходящими при образовании и брожении теста. Процессы клейстеризации и ретроградации крахмала обусловлены как свойствами крахмала, так и амилолитической активностью используемого сырья. Помимо состояния углеводно-амилазного и белково-протеиназного комплексов пшеничной муки на свойства теста оказывает влияние состав и свойства псиллиума, пчелиной перги, клюквы.

Для оценки биохимических и реологических свойств теста на приборе «Миксолаб» измеряется момент силы, Н·м, возникающий на приводе лопастей при замесе в тестомесилке теста из исследуемых образцов КМС и воды. При этом температура в тестомесилке меняется по алгоритму, включенному в программное обеспечение прибора. Результаты исследования свойств теста выражают в числовом и графическом виде.

⁵ ГОСТ ISO 5530-1-2013. Мука пшеничная. Физические характеристики теста. Часть 1. Определение водопоглощения и реологических свойств с применением фаринографа. М.: Стандартинформ, 2014. 15 с.

⁶ ISO 5530-1:1997. Wheat flour – Physical characteristics of doughs. Part 1: Determination of water absorption and rheological properties using a farinograph. Geneva, 1997. 9 p.

⁷ ГОСТ ISO 17718-2015. Зерно и мука из мягкой пшеницы. Определение реологических свойств теста в зависимости от условий замеса и повышения температуры. М.: Стандартинформ, 2016. 32 с.

⁸ ISO 17718:2013. Wholemeal and flour from wheat (*Triticum aestivum* L.) – Determination of rheological behavior as a function of mixing and temperature increase. Geneva, 2013. 13 p.

⁹ ГОСТ Р 55577-2013. Продукты пищевые функциональные. Информация об отличительных признаках и эффективности. М.: Стандартинформ, 2014. 23 с.

Миксолабограмма, иллюстрирующая изменение момента силы в процессе замеса при различных температурных режимах, фиксирует несколько критических точек (С1, С2, С3, С4, С5), соответствующих фазам состояния компонентов теста (рис. 1, 2). Изменяемый крутящий момент в этих точках характеризует протекающие в образцах биохимические процессы.

Данные миксолабограмм (см. рис. 1, 2) подтверждают гипотезу о том, что включение в состав пшеничной КМС псиллиума, клюквы и пчелиной перги приводит к выраженным различиям в параметрах реологического профиля и оцениваемых прибором «Миксолаб» индексов, что свидетельствует о разной скорости биохимических и коллоидных процессов образования и формирования теста в контрольном и опытном образцах.

Основные параметры, полученные для образцов по протоколу Chopin+, представлены в табл. 1, 2.

По сравнению с контрольным образцом в опытном образце теста отмечен рост водопоглощения до 67,2%. Выявленная зависимость связана с тем, что псиллиум и клюква по сравнению с пшеничной мукой содержат существенно большее количество пищевых волокон (целлюлоза, гемицеллюлозы), обладающих способностью связывать и удерживать большее количество воды, чем белки (главным образом глиадин и глютен) и пентозаны пшеницы. Богатая пектиновыми веществами клюква по структуре представляет собой коллоидное капиллярно-пористое тело с тупиковыми капиллярами, что также повышает водопоглощение.

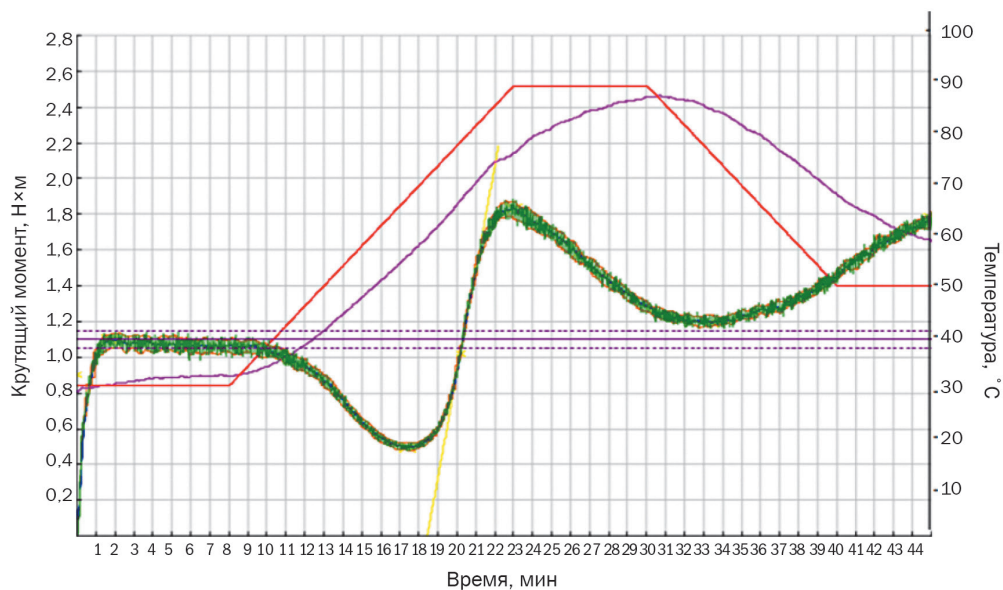


Рис. 1. Миксолабограмма теста из пшеничной муки (контрольный образец)

Fig. 1. Mixolabogram of the dough made from wheat flour (control sample)

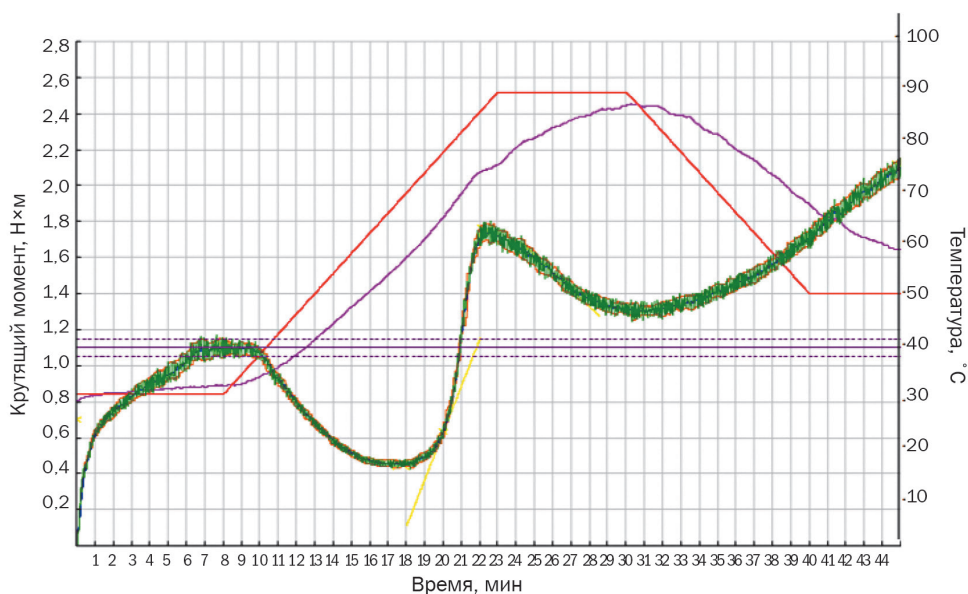


Рис. 2. Миксолабограмма теста из спроектированной композитной мучной смеси (опытный образец)

Fig. 2. Mixolabogram of the dough made from the designed composite flour (prototype)

Таблица 1. Данные миксолабограмм

Table 1. Mixolabogram data

Образец	Водопоглощение, %	Время образования теста, мин	Стабильность теста, мин
Контрольный	58,7	1,75	8,32
Опытный	67,2	8,10	6,55

Таблица 2. Данные миксолабограмм в критических точках

Table 2. Mixolabogram data at critical points

Образец	Крутящий момент \vec{M} , Н×м, и температура теста T , °С, в критических точках миксолабограммы									
	С1		С2		С3		С4		С5	
	\vec{M} , Н×м	T , °С	\vec{M} , Н×м	T , °С	\vec{M} , Н×м	T , °С	\vec{M} , Н×м	T , °С	\vec{M} , Н×м	T , °С
Контрольный	1,100	30,1	0,497	56,0	1,830	76,5	1,195	85,3	1,777	59,0
Опытный	1,108	31,6	0,452	56,1	1,750	74,6	1,300	87,3	2,107	58,8

Одновременно отмечено увеличение времени образования теста с 1,75 мин в контрольном образце до 8,10 мин в спроектированной КМС. Замес теста сопровождается сложным циклом биохимических и коллоидных процессов, влияющих на его реологические свойства, обусловленные изменениями белковых веществ и полисахаридов на уровне молекул. По всей видимости, наличие органических кислот (молочной, лимонной, яблочной и др.) в составе клюквы и пчелиной перги способствует замедлению набухания белков, что увеличивает длительность замеса и время достижения необходимой консистенции теста.

Показатель стабильности теста опытного образца, характеризующий время сохранения консистенции, снижался до 6,55 мин, причем период разжижения теста начинался уже до контролируемого повышения температуры в тестомесилке прибора «Миксолаб», что свидетельствует о низкой устойчивости полуфабриката. По-видимому, наличие в клюкве пектинов, являющихся лиофильными коллоидами, способными растворяться в условиях кислой среды, разжижает тесто и придает ему повышенную вязкость (см. табл. 1).

В течение фазы 2 эксперимента температура в тестомесилке прибора плавно повышается с 30 до 60 °С, при этом происходит снижение значения момента силы до минимального (точка С2), что сопровождается разжижением теста вследствие изменения свойств белков при термическом воздействии. В фазе разжижения проб теста из пшеничной муки и спроектированной КМС отмечено незначительное снижение минимального значения момента силы (0,492 Н×м и 0,452 Н×м соответственно). Внесение клюквы, содержащей значительное количество органических кислот (лимонной, яблочной и др.), а также перги, содержащей до 3,2% молочной кислоты, приводит к изменению растворимости белков. Глиадин и глютен в условиях механического воздействия, повышенной температуры и кислотности неограниченно набухают, происходит разрушение внутри- и межмолекулярных связей в белковых структурах, что снижает пороговое значение энергии, необходимой для деградации клейковинного каркаса теста, сопровождающегося расслаблением структуры теста.

После достижения минимума в точке С2 значение момента силы увеличилось и достигло максимального в точке С3 (фаза 3). На этом этапе под воздействием

высокой температуры, плавно повышаемой от 60 до 90 °С, происходит разрушение гранул крахмала. В исследуемом интервале температур активность амилолитических ферментов максимальна, идет активный амилолиз крахмала с образованием низкомолекулярных декстринов, разжижающих тесто и снижающих вязкость полуфабрикатов.

Анализ миксолабограмм в фазе 3, имитирующей изменения, происходящие в тесте на этапе выпечки, демонстрирует снижение момента силы и температуры клейстеризации крахмала в конце прогрева опытного образца (точка С3). Значение моменты силы в конце прогрева было на 4,4% ниже, чем у контрольного образца, и составляло 1,750 Н×м, при этом температура клейстеризации крахмала по сравнению с контрольным образцом снизилась на 1,9 °С и составила 74,6 °С (см. табл. 2).

Фаза 4, характеризующая стабильность крахмального клейстера при нагреве, показывает большее значение момента силы в опытном образце (1,300 Н×м) по сравнению с контрольным (1,195 Н×м), что свидетельствует о меньшей активности амилолитических ферментов в спроектированной КМС.

В фазе 5 температура снижается с 90 до 50 °С, что позволяет охарактеризовать углеводно-амилазный комплекс образцов и спрогнозировать изменения структурно-механических свойств изделий при хранении, связанные с ретроградацией крахмала. В проведенной серии исследований установлено, что значение момента силы у опытного образца на 15,7% выше, чем у контрольного, что позволяет ожидать большую способность крахмала спроектированной КМС к ретроградации.

В табл. 3 представлены данные о скоростях, характеризующих биохимические реакции при проведении исследования образцов на приборе «Миксолаб» по протоколу Chopin+.

Согласно данным табл. 3 установлено, что скорость разжижения теста у контрольного и опытного образцов была практически одинаковой, скорость клейстеризации крахмала заметно ниже у опытного образца, скорость амилолиза у контрольного образца выше, чем у опытного, что косвенно свидетельствует о более низкой активности амилолитических ферментов в спроектированной КМС в присутствии кислореагирующих веществ в составе теста.

Таблица 3. Расчетные данные скоростей биохимических реакций, Н×м/мин

Table 3. Calculated data of the biochemical reaction rates, Н×м/min

Образец	Скорость разжижения теста	Скорость клейстеризации крахмала	Скорость амилолиза
Контрольный	-0,108	0,582	-0,078
Опытный	-0,104	0,260	-0,096

Для более наглядного описания реологического профиля образцов также проведена графическая интерпретация результатов с применением функции Mixolab Profiler. Для построения радиальной диаграммы (рис. 3) использовали интеграционные индексы профайлера исследуемых образцов (табл. 4).



Рис. 3. Радиальная диаграмма

Fig. 3. Radial diagram

Таблица 4. Индексы Mixolab Profiler

Table 4. Mixolab Profiler indexes

Индекс	Образец	
	контрольный	опытный
Водопоглотительная способность	5	9
Замес	5	5
Глютен+	6	2
Вязкость	6	5
Амилолитическая активность	2	2
Ретроградация крахмала	3	5

Индекс «Водопоглотительная способность» в опытном образце теста на 40% выше, чем в контрольном, что характеризует высокий адсорбционный потенциал спроектированной КМС и свидетельствует о потребности в большем количестве воды для получения теста нужной консистенции. Индекс «Замес», описывающий стабильность теста и время его образования, одинаков для исследуемых образцов. Индекс «Глютен+», описывающий поведение клейковины при нагреве и сохранность консистенции теста, существенно ниже у опытного образца, что характеризует высокую растяжимость такого теста. Низкий показатель данного индекса может быть целевым при использовании КМС для производства галет, тесто для которых должно обладать достаточной растяжимостью. Индекс «Вязкость», характеризующий изменение вязкости теста при нагреве и зависящий от качества крахмала, у

опытного образца на 17% ниже, чем у контрольного, что свидетельствует о менее глубоком разрушении гранул крахмала, разжижении клейстера и менее высокой вязкости теста опытного образца. Индекс «Амилолитическая активность», характеризующий податливость крахмала действию амилаз, говорит об одинаково высокой активности амилолитических ферментов образцов. Индекс «Ретроградация крахмала» характеризует степень повышения плотности крахмального геля, вызывающего его синерезис, сопровождающийся уменьшением объема крахмальных зерен и выделением свободной влаги. Ретроградация крахмала является основным фактором черствения мучных изделий с мягким эластичным мякишем. Высокий индекс ретроградации опытного образца позволяет рекомендовать использовать спроектированную КМС для производства галет как изделий пониженной влажности, процесс черствения в которых практически не протекает.

С учетом выявленных особенностей свойств КМС (низкая температура клейстеризации крахмала, высокая вязкость крахмального клейстера, высокая водопоглотительная способность, высокая растяжимость теста) к рассмотрению могут быть рекомендованы и другие варианты использования смеси (помимо хлебобулочных или мучных кондитерских изделий), позволяющие максимально сохранить термолabile микронутриенты (витамин Е, В1 и β-каротин). Технологии таких продуктов должны не требовать высокотемпературной обработки, иметь короткое время тепловой обработки либо вообще не предполагать дополнительной термообработки. Варианты таких продуктов: кисели (заваривание КМС с последующим охлаждением – псиллиум в составе обеспечивает хорошее загустение); суфле (КМС с фруктовым пюре и яичным белком); коктейли и смузи (смешивание КМС с фруктами, ягодами, молоком/йогуртом); хлебцы (КМС с водой/соком, формирование изделий и сушка при температуре 40–45 °С в дегидраторе или выпечка при температуре 60–65 °С).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в ходе проведенной работы на основе методов математического моделирования путем реализации полного трехфакторного эксперимента спроектирован состав КМС (пшеничная мука, псиллиум, клюква), обогащенной апипродуктами (перга пчелиная): псиллиум – 4,5%, перга пчелиная – от 3,2 до 4,2%, порошок клюквы – от 3,5 до 3,7%, мука пшеничная – остальное. При этом критерии оптимальности, характеризующие качество КМС, составляют: число падения по Хагбергу – Пертену, характеризующее активность α-амилазы – 268 с, кислотность – 10 град., водопоглотительная способность – 65%.

Расчетный химический состав разработанной КМС свидетельствует о ее высокой пищевой ценности (пищевые волокна – 8,1 г / 100 г смеси, витамин Е – 8,1 мг ток. экв., β-каротин – 4,3 мг, витамин В1 – 0,35 мг, железо – 2,7 мг).

Следует отметить, что окончательное содержание термолабильных веществ (витамин Е, В1, β-каротин) в готовой пищевой продукции на основе КМС может отличаться и требует дополнительной оценки.

Изучены физико-химические, биохимические и реологические свойства контрольного (пшеничная мука) и опытного (КМС, включающая псиллиум – 4,5%, пергу пчелиную – 3,8%, порошок клюквы – 3,6%, муку пшеничную – остальное) образцов. Характеристика углеводно-амилазного и белково-протеиназного комплексов образцов изучена на приборе Mixolab по протоколу Chopin+.

Миксолабограммы подтвердили гипотезу о том, что включение в состав пшеничной КМС псиллиума, клюквы и пчелиной перги приводит к выраженным различиям в биохимических и структурно-механических свойствах образцов. Установлено, что значение момента силы у опытного образца на 15,7% выше, чем у контрольного, что позволяет ожидать большую способность крахмала спроектированной КМС к ретроградации.

Скорость разжижения теста у контрольного и опытного образцов практически одинакова, скорость клейстеризации крахмала заметно ниже у опытного образца; скорость амилолиза у контрольного образца выше, чем у опытного, что свидетельствует о высокой активности амилолитических ферментов. С применением функции Mixolab Profiler установлено, что индекс «Глютен+», существенно ниже у опытного образца, что характеризует высокую растяжимость такого теста.

С учетом особенностей состава и свойств КМС она перспективна в качестве полуфабриката для производства продукции повышенной пищевой ценности и хранимоспособности – например, галет, в том числе для населения Арктической зоны России. Могут быть рассмотрены другие варианты использования КМС, позволяющие максимально сохранить термолабильные микронутриенты. Технологии таких продуктов должны не требовать высокотемпературной термообработки и/или иметь короткое время тепловой обработки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Жемухов Р.Ш., Волошин Ю.Н., Жемухова М.М. Проектирование рецептур мучных многокомпонентных изделий функционального назначения // Качество. Инновации. Образование. 2020. N 5. С. 103–108. DOI: 10.31145/1999-513x-2020-5-103-108. EDN: GPCSHG.
2. Мелешкина Е.П., Коломиец С.Н., Коваль А.И., Кириллова Е.В., Жильцова Н.С., Бундина О.И. [и др.]. Получение трехкомпонентной муки, обогащенной горохом и льном // Пищевая промышленность. 2024. N 9. С. 53–55. DOI: 10.52653/PPI.2024.9.9.010. EDN: NPWWES.
3. González-Galeana C., Castañeda-Salazar A., Del Cortez-Trejo M., Gaytán-Martínez M., Campos-Vega R., Mendoza S. Structural and functional properties of a high moisture extruded mixture of pea proteins (*Pisum sativum*), amaranth flour (*Amaranthus hypochondriacus*), and oat flour (*Avena sativa*) // Food Chemistry. 2025. Vol. 463. P. 141042. DOI: 10.1016/j.foodchem.2024.141042.
4. Euan-Pech E., Guerrero L.C., Wilbert R.C., Tintoré S.G., Betancur-Ancona D. Cassava (*Manihot esculenta*) and maize (*Zea mays* L.) flour mixtures for the development of healthy snacks // International Journal of Gastronomy and Food Science. 2024. Vol. 37. P. 100985. DOI: 10.1016/j.ijgfs.2024.100985.
5. Jamanca-Gonzales N.C., Ocrosopoma-Dueñas R.W., Eguilas-Causi Y.M., Padilla-Fabian R.A., Silva-Paz R.J. Techno-functional properties and rheological behavior of quinoa, kiwicha, wheat flours and their mixtures // Molecules. 2024. Vol. 29, no. 6. P. 1374. DOI: 10.3390/molecules29061374.
6. Talens C., Lago M., Simó-Boyle L., Odriozola-Serrano I., Ibargüen M. Desirability-based optimization of bakery products containing pea, hemp and insect flours using mixture design methodology // LWT – Food Science and Technology. 2022. Vol. 168. P. 113878. DOI: 10.1016/j.lwt.2022.113878.
7. Mărgăoan R., Stranț M., Varadi A., Topal E., Yücel B., Cornea-Cipcigan M., et al. Bee collected pollen and beebread: bioactive constituents and health benefits // Antioxidants. 2019. Vol. 8, no. 12. P. 568. DOI: 10.3390/antiox8120568.
8. Végh R., Csóka M., Stefanovits-Bányai E., Juhász R., Sipos L. Biscuits enriched with monofloral bee pollens: nutritional properties, techno-functional parameters, sensory profile, and consumer preference // Foods. 2023. Vol. 12, no. 1. P. 18. DOI: 10.3390/foods12010018.
9. Kaur J., Rasane P., Kumar V., Nanda V., Bhadariya V., Kaur S., et al. Exploring the health benefits of bee pollen and its viability as a functional food ingredient // Reviews in Agricultural Science. 2024. Vol. 12. P. 65–78. DOI: 10.7831/ras.12.0_65.
10. Ertosun S., Aylanc V., Falcão S.I., Vilas-Boas M. Thermal stability and antioxidant activity of bioactive compounds in bread enriched with bee pollen and bee bread // Antioxidants. 2023. Vol. 12, no. 9. P. 1691. DOI: 10.3390/antiox12091691.
11. Baky M.H., Abouelela M.B., Wang K., Farag M.A. Bee pollen and bread as a super-food: a comparative review of their metabolome composition and quality assessment in the context of best recovery conditions // Molecules. 2023. Vol. 28, no. 2. P. 715. DOI: 10.3390/molecules28020715.
12. Belorio M., Gómez M. Psyllium: a useful functional ingredient in food systems // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2022. Vol. 62, no. 2. P. 527–538. DOI: 10.1080/10408398.2020.1822276.
13. Chen C., Shang C., Xin L., Xiang M., Wang Y., Shen Z., et al. Beneficial effects of psyllium on the prevention and treatment of cardiometabolic diseases // Food & Function. 2022. Vol. 13, no. 14. P. 7473–7486. DOI: 10.1039/d2fo00560c.
14. Jalanka J., Major G., Murray K., Singh G., Nowak A., Kurtz C., et al. The effect of psyllium husk on intestinal microbiota in constipated patients and healthy controls // International Journal of Molecular Sciences. 2019. Vol. 20, no. 2. P. 433. DOI: 10.3390/ijms20020433.
15. Franco E.A.N., Sanches-Silva A., Ribeiro-Santos R., de Melo N.R. Psyllium (*Plantago ovata* Forsk): from evidence of health benefits to its food application // Trends of Food Science & Technology. 2020. Vol. 96. P. 166–175. DOI: 10.1016/j.tifs.2019.12.006.
16. Hilal B., Ilkay S. Effect of psyllium and cellulose fiber addition on the structure and the starch digestibility of bread and crackers // Food Structure. 2024. Vol. 35. P. 100302. DOI: 10.1016/j.foostr.2022.100302.
17. Wei F., Wang H., Li X., Cao J., Zhang X. Preparation of Astragalus membranaceus-cranberry biscuits and the evaluation of physicochemical properties and antioxidant activity //

International Journal of Food Science and Technology. 2024. Vol. 59, no. 5. P. 3134-3141. DOI: 10.1111/ijfs.17057.

18. Pateiro M., Vargas-Ramella M., Franco D., da Cruz A.G., Zengin G., Kumar M., et al. The role of emerging technologies in the dehydration of berries: quality, bioactive compounds, and shelf life // *Food Chemistry: X*. 2022. Vol. 16. P. 100465. DOI: 10.1016/j.fochx.2022.100465.

19. Бисчокова Ф.А., Штымова А.Х. Использование ягодных полуфабрикатов дикорастущих растений в производстве хлебобулочных изделий // *Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В.М. Кокова*. 2021. N 1. С. 44–49. EDN: HDZGKI.

20. Taibi A., Lofft Z., Laytouni-Imbriaco B., Comelli E.M. The role of intestinal microbiota and microRNAs in the anti-inflammatory effects of cranberry: from pre-clinical to clinical studies // *Frontiers in Nutrition*. 2023. Vol. 10. P. 1092342. DOI: 10.3389/fnut.2023.1092342.

21. Захарова А.С., Конева С.И. Изучение качественных характеристик многокомпонентных смесей для галет // *Ползуновский вестник*. 2024. N 2. С. 148–154. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.02.019. EDN: KQYSIK.

22. Конева С.И., Захарова А.С. Проектирование состава многокомпонентных смесей для обогащенных галет // *Ползуновский вестник*. 2024. N 3. С. 23–28. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.03.003. EDN: WUXTVB.

REFERENCES

1. Zhemukhov R.SH., Voloshin YU.N., Zhemukhova M.M. Design of recipes for flour multicomponent functional products. *Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie*. 2020;5:103-108. (In Russian). DOI: 10.31145/1999-513x-2020-5-103-108. EDN: GPCSHG.

2. Meleshkina E.P., Kolomiets S.N., Koval A.I., Kirillova E.V., Zhiltsova N.S., Bundina O.I., et al. Preparation of three-component flour enriched with peas and flax. *Food Industry*. 2024;9:53-55. (In Russian). DOI: 10.52653/PPI.2024.9.9.010. EDN: NPWWES.

3. González-Galeana C., Castañeda-Salazar A., Del Cortez-Trejo M., Gaytán-Martínez M., Campos-Vega R., Mendoza S. Structural and functional properties of a high moisture extruded mixture of pea proteins (*Pisum sativum*), amaranth flour (*Amaranthus hypochondriacus*), and oat flour (*Avena sativa*). *Food Chemistry*. 2025;463:141042. DOI: 10.1016/j.foodchem.2024.141042.

4. Euan-Pech E., Guerrero L.C., Wilbert R.C., Tintoré S.G., Betancur-Ancona D. Cassava (*Manihot esculenta*) and maize (*Zea mays* L.) flour mixtures for the development of healthy snacks. *International Journal of Gastronomy and Food Science*. 2024;37:100985. DOI: 10.1016/j.ijgfs.2024.100985.

5. Jamanca-Gonzales N.C., Ocrospoma-Dueñas R.W., Eguilas-Causi Y.M., Padilla-Fabian R.A., Silva-Paz R.J. Techno-functional properties and rheological behavior of quinoa, kiwicha, wheat flours and their mixtures. *Molecules*. 2024;29(6):1374. DOI: 10.3390/molecules29061374.

6. Talens C., Lago M., Simó-Boyle L., Odriozola-Serrano I., Ibarguen M. Desirability-based optimization of bakery products containing pea, hemp and insect flours using mixture design methodology. *LWT – Food Science and Technology*. 2022;168:113878. DOI: 10.1016/j.lwt.2022.113878.

7. Mărgăoan R., Stranț M., Varadi A., Topal E., Yücel B., Cornea-Cipcigan M., et al. Bee collected pollen and beebread: bioactive constituents and health benefits. *Antioxidants*. 2019;8(12):568. DOI: 10.3390/antiox8120568.

8. Végh R., Csóka M., Stefanovits-Bányai E., Juhász R., Sipos L. Biscuits enriched with monofloral bee pollens: nutritional properties, techno-functional parameters, sensory profile, and consumer preference. *Foods*. 2023;12(1):18. DOI: 10.3390/foods12010018.

9. Kaur J., Rasane P., Kumar V., Nanda V., Bhadariya V., Kaur S., et al. Exploring the health benefits of bee pollen and its viability as a functional food ingredient. *Reviews in Agricultural Science*. 2024;12:65-78. DOI: 10.7831/ras.12.0_65.

10. Ertosun S., Aylanc V., Falcão S.I., Vilas-Boas M. Thermal stability and antioxidant activity of bioactive

compounds in bread enriched with bee pollen and bee bread. *Antioxidants*. 2023;12(9):1691. DOI: 10.3390/antiox12091691.

11. Baky M.H., Abouelela M.B., Wang K., Farag M.A. Bee pollen and bread as a super-food: a comparative review of their metabolome composition and quality assessment in the context of best recovery conditions. *Molecules*. 2023;28(2):715. DOI: 10.3390/molecules28020715.

12. Belorio M., Gómez M. Psyllium: a useful functional ingredient in food systems. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2022;62(2):527-538. DOI: 10.1080/10408398.2020.1822276.

13. Chen C., Shang C., Xin L., Xiang M., Wang Y., Shen Z., et al. Beneficial effects of psyllium on the prevention and treatment of cardiometabolic diseases. *Food & Function*. 2022;13(14):7473-7486. DOI: 10.1039/d2fo00560c.

14. Jalanka J., Major G., Murray K., Singh G., Nowak A., Kurtz C., et al. The effect of psyllium husk on intestinal microbiota in constipated patients and healthy controls. *International Journal of Molecular Sciences*. 2019;20(2):433. DOI: 10.3390/ijms20020433.

15. Franco E.A.N., Sanches-Silva A., Ribeiro-Santos R., de Melo N.R. Psyllium (*Plantago ovata* Forsk): from evidence of health benefits to its food application. *Trends of Food Science & Technology*. 2020;96:166-175. DOI: 10.1016/j.tifs.2019.12.006.

16. Hilal B., Ilkay S. Effect of psyllium and cellulose fiber addition on the structure and the starch digestibility of bread and crackers. *Food Structure*. 2024;35:100302. DOI: 10.1016/j.foostr.2022.100302.

17. Wei F., Wang H., Li X., Cao J., Zhang X. Preparation of Astragalus membranaceus-cranberry biscuits and the evaluation of physicochemical properties and antioxidant activity. *International Journal of Food Science and Technology*. 2024;59(5):3134-3141. DOI: 10.1111/ijfs.17057.

18. Pateiro M., Vargas-Ramella M., Franco D., da Cruz A.G., Zengin G., Kumar M., et al. The role of emerging technologies in the dehydration of berries: quality, bioactive compounds, and shelf life. *Food Chemistry: X*. 2022;16:100465. DOI: 10.1016/j.fochx.2022.100465.

19. Bischovkova F.A., Schtimova A.H. The use of berry semi-finished products of wild plants in the production of bakery products. *Izvestiya Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V. M. Kokov*. 2021;1:44-49. (In Russian). EDN: HDZGKI.

20. Taibi A., Lofft Z., Laytouni-Imbriaco B., Comelli E.M. The role of intestinal microbiota and microRNAs in the anti-inflammatory effects of cranberry: from pre-clinical to

clinical studies. *Frontiers in Nutrition*. 2023;10:1092342. DOI: 10.3389/fnut.2023.1092342.

21. Zakharova A.S., Koneva S.I. Study of qualitative characteristics multicomponent mixtures for biscuits. *Polzunovskiy Vestnik*. 2024;2:148-154. (In Russian).

DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.02.019. EDN: KQYSIK.

22. Koneva S.I., Zakharova A.S. Designing the composition of multicomponent mixtures for enriched biscuits. *Polzunovskiy Vestnik*. 2024;3:23-28. (In Russian). DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.03.003. EDN: WUXTVB.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мусина Ольга Николаевна,

д.т.н., доцент, главный научный сотрудник,
Алтайский государственный технический
университет им. И.И. Ползунова,
656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
Российская Федерация,
✉ musinaolga@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-4938-8136>

Захарова Александра Сергеевна,

к.т.н., доцент, старший научный сотрудник,
Алтайский государственный технический
университет им. И.И. Ползунова,
656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
Российская Федерация,
zakharovatpz@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7571-0950>

Конева Светлана Ивановна,

к.т.н., доцент, старший научный сотрудник,
Алтайский государственный технический
университет им. И.И. Ползунова,
656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
Российская Федерация,
skoneva22@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6727-5979>

Вклад авторов

О.Н. Мусина – получение финансирования, разработка концепции, разработка методологии, валидация результатов, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.

А.С. Захарова – проведение исследования, визуализация, валидация результатов, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.

С.И. Конева – проведение исследования, визуализация, валидация результатов, написание черновика рукописи, редактирование рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Поступила в редакцию 19.10.2025.
Одобрена после рецензирования 24.01.2026.
Принята к публикации 13.02.2026.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Olga N. Musina,

Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor,
Chief Researcher,
Polzunov Altai State Technical University,
46, Lenin Ave., Barnaul, 656038,
Russian Federation,
✉ musinaolga@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-4938-8136>

Alexandra S. Zakharova,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor,
Senior Researcher,
Polzunov Altai State Technical University,
46, Lenin Ave., Barnaul, 656038,
Russian Federation,
zakharovatpz@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7571-0950>

Svetlana I. Koneva,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor,
Senior Researcher,
Polzunov Altai State Technical University,
46, Lenin Ave., Barnaul, 656038,
Russian Federation,
skoneva22@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6727-5979>

Contribution of the authors

Olga N. Musina – funding acquisition, conceptualization, methodology, validation, writing – original draft, editing.

Alexandra S. Zakharova – investigation, visualization, validation, writing – original draft, editing.

Svetlana I. Koneva – investigation, visualization, validation, writing – original draft, editing.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 19.10.2025.
Approved after reviewing 24.01.2026.
Accepted for publication 13.02.2026.