Статья поступила в редакцию: 01.10.2026
Статья принята к публикации: 09.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 664.68:664.644.5

Многокритериальная оптимизация рецептур и оценка качества печенья с пониженным аллергенным потенциалом

Каримова Татьяна Яхшиевна
соискатель
Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара
E-mail: gulinozfattiloyevna@gmail.com

Multi-criteria optimisation of formulations and quality assessment of cookies with reduced allergenic potential

Karimova Tatyana Yakhshiyevna
Degree Applicant
Bukhara State Technical University
Uzbekistan, Bukhara

Аннотация

Приведены результаты математического планирования эксперимента, регрессионного анализа и многокритериальной оптимизации рецептур сахарного печенья с пониженным аллергенным потенциалом. Цель исследования — разработка и оптимизация рецептур сахарного печенья с пониженным аллергенным потенциалом за счёт замены традиционных компонентов растительными аналогами. В опытных образцах меланж заменяли аквафабой нута, сливочное масло — растительным маслом, пшеничную муку высшего сорта — мукой второго сорта с отрубями либо безглютеновой смесью рисовой и кукурузной муки. Эксперимент проводили по плану Бокса–Бенкена с применением регрессионного анализа и многокритериальной оптимизации. Факторами служили дозировки аквафабы, растительного масла и волокнистого растительного компонента; откликами — расплываемость и органолептическая оценка. Получены уравнения регрессии второго порядка и определён компромиссный оптимум: X1 = +0,15; X2 = +0,81; X3 = +1,00 при D = 0,71. Опытные образцы соответствовали требованиям ГОСТ 24901–2023: влажность составила 6,0–6,1 %, содержание жира — 14,0–14,5 % против 18,2 % в контроле, намокаемость — 172–185 %. Дегустационная оценка составила 4,2 и 4,4 балла, энергетическая ценность снизилась с 458 до 405–412 ккал/100 г. Разработаны две рецептуры сахарного печенья с пониженным содержанием жира и энергетической ценностью при сохранении нормативных физико-

Библиографическое описание: Каримова Т.Я. Многокритериальная оптимизация рецептур и оценка качества печенья с пониженным аллергенным потенциалом // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23529

химических и приемлемых органолептических показателей. Практическая значимость состоит в возможности расширения ассортимента специализированных мучных кондитерских изделий.

Abstract

The results of experimental design, regression analysis, and multicriteria optimization of sugar cookie formulations with reduced allergenic potential are presented. The aim of the study was to develop and optimize sugar cookie formulations with reduced allergenic potential by replacing conventional ingredients with plant-based alternatives. In the experimental samples, egg mélange was replaced with chickpea aquafaba, butter with vegetable oil, and premium-grade wheat flour with second-grade wheat flour containing bran or a gluten-free blend of rice and corn flours. The experiment was carried out using a Box–Behnken design combined with regression analysis and multicriteria optimization. The factors were the levels of aquafaba, vegetable oil, and a fiber-rich plant component, while spreadability and sensory score were used as responses. Second-order regression equations were obtained, and a compromise optimum was identified: X1 = +0.15, X2 = +0.81, and X3 = +1.00 at D = 0.71. The experimental samples met the requirements of GOST 24901–2023: moisture content was 6.0–6.1 %, fat content was 14.0–14.5 % compared with 18.2 % in the control, and water absorption was 172–185 %. Sensory scores were 4.2 and 4.4 points, while the energy value decreased from 458 to 405–412 kcal/100 g. Two sugar cookie formulations with reduced fat and energy content were developed while maintaining standard physicochemical characteristics and acceptable sensory properties. The practical significance of the study lies in the possibility of expanding the range of specialized flour confectionery products.

Ключевые слова: сахарное печенье, аквафаба нута, план Бокса–Бенкена, уравнение регрессии, функция желательности Харрингтона, безглютеновое печенье, показатели качества.

Keywords: sugar cookies, chickpea aquafaba, Box–Behnken design, regression equation, Harrington desirability function, gluten-free cookies, quality indicators.

Введение

Традиционные рецептуры печенья могут включать пшеничную муку, яичные и молочные продукты, орехи. Эти ингредиенты относятся к компонентам, которые могут вызывать аллергические реакции или противопоказаны при отдельных заболеваниях и подлежат обязательному указанию в составе пищевой продукции [4, с. 10–11]. В Республике Узбекистан совершенствование профилактики аллергических заболеваний и оказания специализированной помощи предусмотрено постановлением Президента Республики Узбекистан от 23 ноября 2023 г. № ПП-371 [3, п. 1].

Одним из направлений модификации рецептур является замена яичных продуктов аквафабой — отваром нута, обладающим пенообразующими и эмульгирующими свойствами [10, с. 6–7]. При исключении пшеничной муки изменяются структурно-механические свойства теста, поэтому особое значение приобретают регулирование влажности и подбор соотношения рецептурных компонентов [2, с. 61–62; 6, с. 2]. Яблочный жмых представляет

интерес как источник пищевых волокон и полифенолов; его внесение влияет на водопоглощение, реологические характеристики теста и качество готовых изделий [9, с. 3244–3251; 11, с. 686–692].

Цель работы — определить рациональную область рецептурных параметров печенья с аквафабой нута, растительным маслом и волокнистыми компонентами и оценить качество разработанных изделий.

Материалы и методы

Объектами исследования служили три образца сахарного печенья: контроль-печенье «Южное» по рецептуре № 137 (пшеничная мука высшего сорта, сливочное масло, меланж); опыт 1-печенье ЭКО «Анти-Аллерджи» на смеси пшеничной муки 2 сорта и отрубей (4:1) с кунжутным маслом, аквафабой, яблочным жмыхом и подсолнечным шротом; опыт 2-безглютеновое печенье «Южное» на смеси рисовой и кукурузной муки (1:1) с подсолнечным маслом, аквафабой, изюмом и семенами подсолнечника. Аквафабу получали из нута сорта «Юлдуз».

Эксперимент планировали по трёхуровневому плану Бокса–Бенкена, предназначенному для построения моделей второго порядка [5, с. 455–458]. Факторами служили: X_1 — дозировка аквафабы нута; X_2 — дозировка растительного масла; X_3 — уровень внесения яблочного жмыха для опыта 1 или степень гидратации мучной смеси для опыта 2. В качестве откликов использовали расплываемость печенья Y_1, определяемую как отношение диаметра изделия к его высоте, и интегральную органолептическую оценку Y_2. Уровни варьирования факторов в расчёте на 100 кг сухой мучной основы приведены в таблице 1.

Данные обрабатывали с использованием полиномиальных моделей второго порядка, исключая коэффициенты, незначимые по критерию Стьюдента. Отклики объединяли в интегральный критерий D с использованием обобщённой функции желательности Харрингтона [8, с. 494–498].

Качество изделий лабораторных выпечек оценивали по органолептическим и физико-химическим показателям, предусмотренным ГОСТ 24901–2023 [1, с. 3–6]. Органолептические показатели определяли по ГОСТ 5897–90 и дополнительно оценивали по принятой в работе 5-балльной шкале. Массовую долю влаги определяли по ГОСТ 5900–2014, сахара — по ГОСТ 5903–89, щёлочность — по ГОСТ 5898–2022, намокаемость — по ГОСТ 10114–80; соответствующие методы контроля предусмотрены разделом 7 ГОСТ 24901–2023 [1, с. 7]. Значения гликемического индекса получены в ходе собственных исследований. Определения выполняли в трёх повторностях; результаты представляли как среднее значение ± стандартное отклонение. Уровень статистической значимости принимали равным 0,05.

Таблица 1. Уровни варьирования основных рецептурных факторов

Уровень	X_1 - аквафаба, кг	X_2-растительное масло, кг	X_3-волокнистый компонент, кг
Нижний (–1)	10,0	10,0	5,0
Центральный (0)	14,0	12,5	7,5
Верхний (+1)	18,0	15,0	10,0

Уровень	X_1 - аквафаба, кг	X_2-растительное масло, кг	X_3-волокнистый компонент, кг
Точка компромиссного оптимума	X_1 = +0,15 (14,6 кг)	X_2 = +0,81 (14,5 кг)	X_3 = +1,00 (10,0 кг)

Для многокритериальной оптимизации использовали обобщённую функцию желательности Харрингтона [8, с. 494–498]. По результатам расчётов наибольшее значение D = 0,71 получено в точке компромиссного оптимума: X_1 = +0,15; X_2 = +0,81; X_3 = +1,00.

Результаты и обсуждения

Для расплываемости в кодированных значениях X_1 и X_2 получена зависимость:

$$Y_1 = 5{,}20 + 0{,}80X_1 - 0{,}50X_2 + 0{,}30X_1X_2 - 0{,}15X_1^2 - 0{,}22X_2^2. \quad (1)$$

Положительный коэффициент при X_1 показывает, что увеличение доли аквафабы способствует росту расплываемости; отрицательный коэффициент при X_2 указывает на обратное влияние жировой фазы. Квадратичные члены подтверждают нелинейный характер процесса, а положительный коэффициент взаимодействия X_1X_2 (+0,30)-совместное действие гидроколлоидов аквафабы и липидной фазы масла. В пределах плана поверхность не имеет экстремума (рисунок 1, а): расплываемость изменяется от 3,23 до 5,90. Компромиссный технологический оптимум соответствует X_1 = +0,15 и X_2 = +0,81 (Y_1 = 4,80): в этой точке достигается пластичность полуфабриката, обеспечивающая сохранение чёткости контура и рельефа печенья.

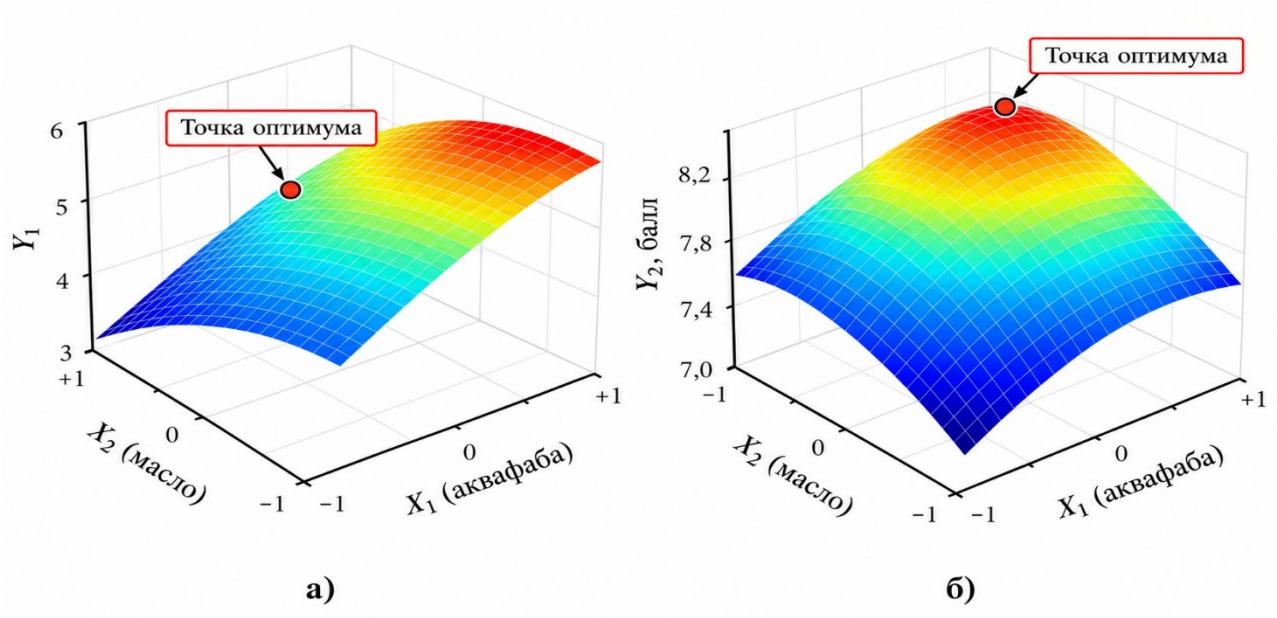

Рисунок 1. Поверхности отклика Y_1 (а) и Y_2 (б); маркеры-компромиссный оптимум и максимум оценки

Модель интегральной органолептической оценки после исключения статистически незначимых эффектов имеет вид:

$$Y_2 = 8{,}05 + 0{,}32X_1 + 0{,}26X_2 - 0{,}22X_1^2 - 0{,}16X_2^2. \quad (2)$$

Функция представляет собой параболический купол (рисунок 1, б), вершина которого (X_1 = +0,73; X_2 = +0,81; Y_2 = 8,27 балла) соответствует 16,9 кг аквафабы и 14,5 кг масла. Дальнейшее увеличение дозировок снижает оценку: избыток поверхностно-активных веществ нутового отвара придаёт тесту липкость, а избыток масла вызывает салистое послевкусие.

Оптимизация по обобщённой функции желательности Харрингтона дала наибольшее значение D = 0,71 в точке компромиссного оптимума (X_1 = +0,15; X_2 = +0,81; X_3 = +1,00), что соответствует оценке «хорошо» [8]. Рациональная область рецептурных параметров-15,0–18,0 кг аквафабы, 10,0–15,0 кг растительного масла и 5,0–10,0 кг волокнистого компонента на 100 кг мучной основы; такое соотношение способствует связыванию свободной влаги полисахаридами нута и частично компенсирует отсутствие клейковинного каркаса.

По результатам дегустации (рис.2) наивысшую оценку получил контрольный образец-4,8 балла: сливочное масло и пшеничная мука формируют характерную хрупкость, аромат и равномерную структуру.

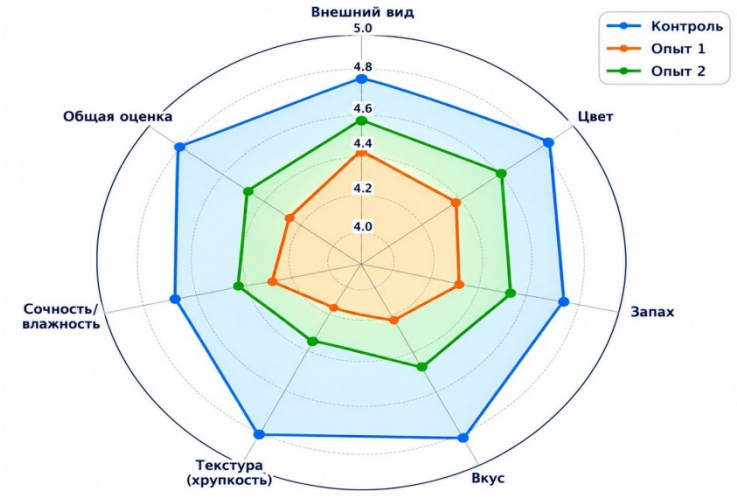

Рисунок 2. Профилограмма дегустационной оценки качества печенья

У образца 1 общая оценка снизилась до 4,2 балла, главным образом по показателям «вкус» и «текстура», при этом внешний вид и цвет оценены в 4,4–4,5 балла. Образец 2 более сбалансирован: по внешнему виду, цвету и запаху он ближе к контролю, итоговая оценка-4,4 балла.

По физико-химическим показателям все образцы соответствуют требованиям ГОСТ 24901–2023 (таблица 2); влажность составила 5,8–6,1 % при норме не более 10,0 %.

Таблица 2. Показатели качества исследуемых образцов печенья

Показатель	Норматив по ГОСТ 24901–2023 [1, с. 5–6]	Контроль	Опыт 1	Опыт 2
Массовая доля влаги, %, не более	10,0	5,8 ± 0,2	6,1 ± 0,2	6,0 ± 0,2
Массовая доля сахара в пересчёте на сахарозу, %, не более	35,0	32,5 ± 0,5	22,1 ± 0,4	31,8 ± 0,5
Массовая доля жира, %, не более	30,0	18,2 ± 0,3	14,5 ± 0,3	14,0 ± 0,3
Щёлочность, град, не более	2,0	1,5 ± 0,1	1,3 ± 0,1	1,4 ± 0,1

Показатель	Норматив по ГОСТ 24901–2023 [1, с. 5–6]	Контроль	Опыт 1	Опыт 2
Намокаемость, %, не менее	150,0	165 ± 5	185 ± 5	172 ± 5
Прочность на разлом, Н	-	12,5 ± 0,5	8,7 ± 0,4	9,2 ± 0,4
Размер крошки, мм	-	1,0 ± 0,2	1,7 ± 0,2	1,2 ± 0,2

Примечание. Норматив намокаемости не менее 150 % установлен для сахарного печенья толщиной 13 мм и менее.

По представленным в таблице 2 показателям массовой доли влаги, сахара, жира и щёлочности исследованные образцы соответствуют требованиям ГОСТ 24901–2023 к сахарному печенью [1, с. 5]. Влажность составила 5,8–6,1 % при нормативном значении не более 10,0 %.

Согласно примечанию 2 к таблице 2 ГОСТ 24901–2023, намокаемость печенья с добавлениями не определяют [1, с. 5]. Для исследованных образцов с такими добавлениями результаты определения намокаемости приведены как сравнительная технологическая характеристика.

В образце 1 массовая доля сахара снизилась до 22,1 % вследствие замены изюма яблочным жмыхом; в образце 2 она близка к контролю и составила 31,8 %. Массовая доля жира в опытных образцах находилась в пределах 14,0–14,5 % против 18,2 % в контроле, щёлочность составила 1,3–1,5 град. Повышение намокаемости, особенно в образце 1 - до 185 %, предположительно связано с водоудерживающей способностью волокнистых компонентов. Такое объяснение согласуется с опубликованными данными об увеличении водопоглощения мучных смесей при внесении яблочного жмыха [9, с. 3244–3251; 11, с. 686–692]. Пористость опытных образцов составила 22,0–25,0 %. Прочность на разлом снизилась до 8,7–9,2 Н против 12,5 Н в контроле. Наблюдаемые изменения могут быть связаны с уменьшением доли клейковинных белков и включением растительных частиц в структуру изделий. Увеличение размера крошки в образце 1 до 1,5–2,0 мм предположительно обусловлено присутствием частиц отрубей и жмыха.

Комплексный анализ рецептур и показателей качества представлен в таблице 3.

По результатам собственных исследований энергетическая ценность опытных образцов составила 405–412 ккал/100 г против 458 ккал/100 г в контроле. Образец 1 отличается включением дополнительных источников пищевых волокон. В рецептуре образца 2 отсутствует глютенсодержащее сырьё; полученное в работе значение гликемического индекса составило 45 ± 3. Значимость контроля данного показателя для рисового печенья согласуется с исследованием C.L. Pereira и соавторов, в котором состав мучной основы и внесение рисовых отрубей влияли на расчётный гликемический индекс и переваримость крахмала [6, с. 8–10].

Таблица 3. Комплексный анализ рецептур исследуемых образцов печенья

Критерий	Контроль	Опыт 1	Опыт 2
Энергетическая ценность, ккал/100 г	458 ± 15	412 ± 12	405 ± 12
Гликемический индекс (ГИ), усл. ед.	75 ± 3	58 ± 3	45 ± 3

Критерий	Контроль	Опыт 1	Опыт 2
Аллергенность	Высокая (глютен, яйца, молоко, орехи)	Средняя (глютен, кунжут)	Низкая (без пшеницы, яиц и молока)
Технологичность	Простая, проверенная	Сложнее - требуется контроль соотношения аквафабы	Сложнее - требуется контроль гидратации мучной смеси
Экономическая эффективность	Средняя	Высокая-замена масла и меланжа вторичным сырьём	Средняя-рисовая и кукурузная мука дороже пшеничной
Целевая аудитория	Массовый потребитель	Частично ограниченная (здоровое питание)	Специализированная (целиакия, аллергия, веганство)

Обозначение образца 2 как безглютенового продукта требует подтверждения содержания глютена не более 20 мг/кг готового изделия в соответствии с CXS 118 – 1979 [7, с. 2]. Стандарт также предусматривает предотвращение загрязнения глютеном при производстве и применение соответствующих аналитических методов контроля [7, с. 2–3].

Разработанные рецептуры печенья № 137 ЭКО «Анти-Аллерджи» (опыт 1) и № 137 гипоаллергенного (безглютенового) «Южное» (опыт 2) приведены в таблице 4. Количество масла в них сохранено на уровне базовой рецептуры (26,25 кг), что превышает изученный при моделировании диапазон и требует проверки моделей в расширенном диапазоне.

Таблица 4. Сводные рецептуры печенья (расход сырья на загрузку, кг)

Наименование сырья	СВ*, %	Опыт 1		Опыт 2	
		в натуре	в СВ	в натуре	в СВ
Мука пшеничная 2 сорт и отруби	85,6	100,00	85,50	-	-
Мука рисовая и кукурузная	88,45	-	-	100,00	88,10
Сахарная пудра	99,85	33,40	33,35	33,40	33,35
Масло кунжутное	100,0	26,25	26,25	-	-
Масло подсолнечное	100,0	-	-	26,25	26,25
Аквафаба (отвар нута)	8,0	11,25	0,90	11,25	0,90
Яблочный жмых	90,0	13,40	12,06	-	-
Шрот подсолнечный	92,0	15,00	13,80	-	-
Изюм натуральный (без SO_2)	74,0	-	-	22,10	16,40
Семена подсолнечника	93,0	-	-	16,60	15,40
Соль поваренная пищевая	96,5	0,55	0,53	0,55	0,53
Натрий двууглекислый	50,0	0,68	0,34	0,68	0,34
Аммоний углекислый	-	1,11	-	1,11	-
Итого	-	**201,64**	**172,73**	**211,94**	**181,27**

**Примечание: СВ – сухие вещества*

Заключение

В результате математического моделирования и многокритериальной оптимизации определён компромиссный оптимум рецептурных факторов: X_1=+0,15, X_2=+0,81, X_3=+1,00 при значении функции желательности D=0,71. Полученные модели позволили установить рациональное сочетание аквафабы, растительного масла и волокнистых компонентов, обеспечивающее требуемые технологические и органолептические свойства печенья.

Разработанные образцы соответствовали требованиям ГОСТ 24901–2023 по основным нормируемым показателям. Содержание жира снизилось до 14,0–14,5 % против 18,2 % в контроле, энергетическая ценность — до 405–412 ккал/100 г против 458 ккал/100 г. Дегустационная оценка составила 4,2–4,4 балла. Полученные результаты подтверждают перспективность использования растительных компонентов при разработке печенья с пониженным аллергенным потенциалом и сниженной энергетической ценностью.

Список литературы

1. ГОСТ 24901–2023. Печенье. Общие технические условия. – М.: Российский институт стандартизации, 2023. – 17 с.
2. Кузьмина С.С., Козубаева Л.А., Егорова Е.Ю. Управление реологическими свойствами теста для обеспечения качества безглютенового печенья // Ползуновский вестник. – 2023. – № 2. – С. 60–66. – DOI: 10.25712/ASTU.2072–8921.2023.02.008.
3. О мерах по повышению качества профилактики и лечения аллергических заболеваний: постановление Президента Республики Узбекистан от 23.11. № ПП-371 // LexUZ: Национальная база данных законодательства Республики Узбекистан. – 2023. – № 6673875.
4. ТР ТС 022/2011. Пищевая продукция в части ее маркировки: технический регламент Таможенного союза: утв. Решением Комиссии Таможенного союза от 09.12.2011 г. № 881 (ред. от 22.04.2024).
5. Box G.E.P., Behnken D.W. Some new three level designs for the study of quantitative variables // Technometrics. – 1960. – Т. 2, № 4. – P. 455–475. – DOI: 10.1080/00401706.1960.10489912.
6. C.L. Pereira, I. Sousa, C. Roseiro [et al.]. Development and evaluation of gluten-free rice biscuits: impact on glycaemic index and bioactive compounds // Foods. – 2025. – Т. 14, № 13. – Art. 2276. – DOI: 10.3390/foods14132276.
7. Codex Alimentarius. Standard for Foods for Special Dietary Use for Persons Intolerant to Gluten: CXS 118–1979. – Revised 2008; amended 1983. – Rome: FAO/WHO, 2015. – 3 P.
8. Harrington E.C. The desirability function // Industrial Quality Control. – 1965. – Т. 21, № 10. – P. 494–498.
9. M. Usman, S. Ahmed, A. Mehmood [et al.]. Effect of apple pomace on nutrition, rheology of dough and cookies quality // Journal of Food Science and Technology. – 2020. – Т. 57, № 9. – P. 3244–3251. – DOI: 10.1007/s13197-020-04355-z.

10. Stasiak J., Stasiak D.M., Libera J. The potential of aquafaba as a structure-shaping additive in plant-derived food technology // Applied Sciences. – 2023. – T. 13, № 7. – Art. 4122. – DOI: 10.3390/app13074122.
11. Sudha M.L., Baskaran V., Leelavathi K. Apple pomace as a source of dietary fiber and polyphenols and its effect on the rheological characteristics and cake making // Food Chemistry. – 2007. – T. 104, № 2. – P. 686–692. – DOI: 10.1016/j.foodchem.2006.12.016.

References

1. GOST 24901 Pechen'e. Obshchie tekhnicheskie usloviya [Biscuits. General specifications]. Moscow: Russian Institute for Standardization, 2023. – Moscow: Russian Institute for Standardization, 2023. – 17 P. (In Russ.).
2. Kuzmina S.S., Kozubaeva L.A., Egorova E.Yu. [Control of rheological properties of the dough to ensure the quality of gluten-free cookies] // Polzunovskiy vestnik. – 2023. – No. 2. – P. 60–66. – DOI: 10.25712/ASTU.2072–8921.2023.02.008. (In Russ.).
3. O merakh po povysheniyu kachestva profilaktiki i lecheniya allergicheskikh zabolevaniy [On measures to improve the quality of prevention and treatment of allergic diseases]: Resolution of the President of the Republic of Uzbekistan dated 23.11.2023. № PP-371 // LexUZ: National Database of Legislation of the Republic of Uzbekistan. Document. – 2023. – No. 6673875. (In Russ.).
4. TR TS 022/2011. Pishchevaya produktsiya v chasti ee markirovki [Food products in terms of their labelling]: Technical Regulation of the Customs Union, approved by Decision of the Customs Union Commission dated 09.12.2011 No. 881 (as amended on 22.04.2024). (In Russ.).
5. Box G.E.P., Behnken D.W. Some new three level designs for the study of quantitative variables // Technometrics. – 1960. – Vol. 2, No. 4. – P. 455–475. – DOI: 10.1080/00401706.1960.10489912.
6. C.L. Pereira, I. Sousa, C. Roseiro [et al.]. Development and evaluation of gluten-free rice biscuits: impact on glycaemic index and bioactive compounds // Foods. – 2025. – Vol. 14, No. 13. – Art. 2276. – DOI: 10.3390/foods14132276.
7. Codex Alimentarius. Standard for Foods for Special Dietary Use for Persons Intolerant to Gluten: CXS 118–1979. Revised 2008; amended 1983. – Rome: FAO/WHO, 2015. – 3 P.
8. Harrington E.C. The desirability function // Industrial Quality Control. – 1965. – Vol. 21, No. 10. – P. 494–498.
9. M. Usman, S. Ahmed, A. Mehmood [et al.]. Effect of apple pomace on nutrition, rheology of dough and cookies quality // Journal of Food Science and Technology. – 2020. – Vol. 57, No. 9. – P. 3244–3251. – DOI: 10.1007/s13197-020-04355-z.
10. Stasiak J., Stasiak D.M., Libera J. The potential of aquafaba as a structure-shaping additive in plant-derived food technology // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, No. 7. – Art. 4122. – DOI: 10.3390/app13074122.

11. Sudha M.L., Baskaran V., Leelavathi K. Apple pomace as a source of dietary fiber and polyphenols and its effect on the rheological characteristics and cake making // Food Chemistry. – 2007. – Vol. 104, No. 2. – P. 686–692. – DOI: 10.1016/j.foodchem.2006.12.016.