






Сравнительный анализ (обзор) пенообразующей способности белков растительного и животного происхождения для использования в пищевых системах

Екатерина М. Колодина	¹	goodwill_katya@mail.ru	 0009-0009-5349-1855
Кирилл Э. Сырых	¹	starinabil13@mail.ru	 0009-0002-7490-2747
Газибег О. Магомедов	²	gazibeck.magomedov@ya.ru	 0000-0002-7201-8387
Магомед Г. Магомедов	²	mmg@inbox.ru	 0000-0003-2494-4973
Зурет Н. Хатко	¹	znkhatko@mail.ru	 0000-0001-7097-1345






¹ Майкопский государственный технологический университет, ул. Первомайская, 191, г. Майкоп, Республика Адыгея, 385000, Россия

² Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. В статье представлен анализ научной литературы, который свидетельствует о значительном потенциале различных видов муки и нетрадиционных источников как белковых пенообразователей для применения в пищевых системах. Наиболее перспективными с точки зрения пенообразования являются ржаная мука, аквафаба, мука из тыквенных семечек после микрофлюидизации и соевый изолят, которые проявляют высокую пенообразующую способность, причем ржаная мука и льняной белковый концентрат также формируют очень стабильные пены. Проведен сравнительный анализ пенообразующих свойств белковых компонентов, входящих в состав муки из традиционных зерновых (пшеница, рожь, кукуруза, овес, рис), бобовых (соя, горох, нут, чечевица), псевдозерновых (гречиха, амарант) культур, а также нетрадиционных источников белка (насекомые, пажитник, вторичные продукты переработки пшеницы). Рассмотрены молекулярные механизмы формирования и стабилизации пищевых пен, определяющая роль водорастворимых фракций (альбуминов) и влияние белково-полисахаридных комплексов. Систематизированы данные о воздействии технологических факторов (рН, температура, концентрация белка) и физико-химической модификации (ферментативный гидролиз, микрофлюидизация, радиочастотный нагрев) на пенообразующую способность и устойчивость пен. Установлено, что наибольший потенциал как эффективные пенообразователи имеют ржаная мука, аквафаба и соевый изолят, сочетающие высокую пенообразующую способность с хорошей стабильностью пен. Особое внимание уделено сравнительной характеристике поведения белков на границах раздела фаз «воздух-вода» и «масло-вода», а также перспективам использования комбинированных белковых систем и экстрактов (аквафабы) для создания продуктов с заданными реологическими свойствами и повышенной пищевой ценностью. Результаты обзора имеют практическое значение для использования в пищевых системах, в частности технологии хлебопечения.

Ключевые слова: пенообразующая способность, стабильность пены, белки муки, растительные белки, животные белки, белково-полисахаридные комплексы, ферментативный гидролиз, микрофлюидизация, радиочастотный нагрев.

Comparative analysis (review) of foaming ability of vegetable and animal proteins for use in food systems

Ekaterina M. Kolodina	¹	goodwill_katya@mail.ru	 0009-0009-5349-1855
Kirill E. Strykh	¹	starinabil13@mail.ru	 0009-0002-7490-2747
Gazibeg O. Magomedov	²	gazibeck.magomedov@ya.ru	 0000-0002-7201-8387
Magomed G. Magomedov	²	mmg@inbox.ru	 0000-0003-2494-4973
Zuret N. Khatko	¹	znkhatko@mail.ru	 0000-0001-7097-1345

¹ Maikop State Technological University, Pervomaiskaya str., 191, Maykop, Republic of Adygea, 385000, Russia

² Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Ave., 19, Voronezh, 394036, Russia

Abstract. The article presents an analysis of the scientific literature, which indicates the significant potential of various types of flour and non-traditional sources as protein foaming agents for use in food systems. The most promising from the point of view of foaming are rye flour, aquafaba, pumpkin seed flour after microfluidization and soy isolate, which exhibit high foaming ability, and rye flour and flax protein concentrate also form very stable foams. A comparative analysis of the foaming properties of protein components that make up flour from traditional cereals (wheat, rye, corn, oats, rice), legumes (soybeans, peas, chickpeas, lentils), pseudo-grain (buckwheat, amaranth) crops, as well as non-traditional protein sources (insects, fenugreek, secondary wheat products). The molecular mechanisms of formation and stabilization of food foams, the determining role of water-soluble fractions (albumins) and the influence of protein-polysaccharide complexes are considered. The data on the effects of technological factors (pH, temperature, protein concentration) and physico-chemical modification (enzymatic hydrolysis, microfluidization, radiofrequency heating) are systematized the foaming ability and stability of foams. It has been established that rye flour, aquafaba and soy isolate have the greatest potential as effective foaming agents, combining high foaming ability with good foam stability. Special attention is paid to the comparative characteristics of the behavior of proteins at the interface of the "air-water" and "oil-water" phases, as well as the prospects for using combined protein systems and extracts (aquafabs) to create products with specified rheological properties and increased nutritional value. The results of the review are of practical importance for use in food systems, in particular bakery technology.

Keywords: foaming ability, foam stability, flour proteins, vegetable proteins, animal proteins, protein-polysaccharide complexes, enzymatic hydrolysis, microfluidization, radiofrequency heating.

Для цитирования

Колодина Е.М., Сырых К.Э., Магомедов Г.О., Магомедов М.Г., Хатко З.Н. Сравнительный анализ (обзор) пенообразующей способности белков растительного и животного происхождения для использования в пищевых системах // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 2. С. 172–186. doi:10.20914/2310-1202-2026-2-172-186

For citation

Kolodina E.M., Strykh K.E., Magomedov G.O., Magomedov M.G., Khatko Z.N. Comparative analysis (review) of foaming ability of vegetable and animal proteins for use in food systems. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 2. pp. 172–186. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-2-172-186

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Пенообразование представляет собой сложный физико-химический процесс, при котором газ диспергируется в жидкой фазе с образованием высококонцентрированной дисперсной системы. В пищевых технологиях способность ингредиентов формировать и стабилизировать пены имеет критическое значение для производства хлебобулочных и кондитерских изделий, взбитых десертов, суфле и других аэрированных продуктов [1].

Растительные белки, входящие в состав различных видов муки, обладают поверхностно-активными свойствами, пенообразующей и стабилизирующей способностью, которые существенно варьируют в зависимости от источника белка, его фракционного состава, молекулярной структуры и технологических параметров среды, в которой находятся [2, 3]. В качестве эталонных пенообразователей рассматриваются яичный альбумин и белки молока. Однако растущий интерес к растительным альтернативам, экономическая целесообразность и необходимость расширения ассортимента продуктов питания стимулируют углубленное изучение пенообразующих свойств белков различных видов муки [4, 5].

Цель работы – систематизация и сравнительный анализ научных данных о пенообразующих свойствах белков различных видов зерновых, бобовых культур и белков из нетрадиционных источников, а также выявление закономерностей, определяющих их функциональное поведение в пищевых системах.

Материалы и методы

Систематический поиск литературы выполнен в соответствии с рекомендациями PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses). Поиск проведен в базах данных PubMed, Scopus, Web of Science, Google Scholar, eLibrary.ru и КиберЛенинка, охватывающих период с 2019 по 2026 год. Дополнительно проведен ручной поиск по спискам литературы (snowballing) из идентифицированных обзоров.

В обзор включена 72 работы, в которых количественно оценивались пенообразующая способность и стабильность пены белков. Для каждой включенной работы фиксирован вид сырья; белковая фракция; методы модификации (ферментативный гидролиз, микрофлюидизация, радиочастотный нагрев) или ее отсутствие; условия пенообразования (рН, температура, концентрация белка) и количественные показатели пенообразующей способности и стабильности пены.

Результаты и обсуждение

Большинство людей получают белок из продуктов животного происхождения, таких как яйца, мясо и молочные продукты. Однако они дороже растительных источников белка и их потребление может вызывать тяжелые аллергические реакции. Ферментативный гидролиз позволяет снизить аллергенность яичного белка, который обладает наиболее сбалансированным аминокислотным составом. Функциональные свойства яичного белка можно улучшить путем смешивания его с гидролизатами растительных белков, которые обладают сбалансированным аминокислотным составом, низкой аллергенностью и высокими функционально-технологическими свойствами [3, 6].

Пенообразование начинается с адсорбции поверхностно-активных веществ (ПАВ) на границе раздела фаз газ-жидкость. Белки, как высокомолекулярные ПАВ, способны снижать поверхностное натяжение и формировать прочные межфазные адсорбционные слои. Процесс пенообразования включает несколько стадий: диффузию белка к поверхности раздела, адсорбцию и конформационные изменения (развертывание) молекулы на границе фаз, формирование вязкоупругой пленки, стабилизирующей пузырьки газа [7].

Пенообразующая способность характеризуется объемом пены, образуемой при стандартных условиях, а стабильность пены определяет способность системы сохранять первоначальную структуру во времени, противостоять дренажу, коалесценции и диспропорционированию газовых пузырьков [2, 8].

В отличие от низкомолекулярных ПАВ, белки образуют на межфазной границе не мономолекулярный слой, а объемную структуру с высокой вязкостью и механической прочностью. Ключевыми характеристиками, определяющими пенообразующие свойства белков, являются: гидрофильно-гидрофобный баланс молекулы; молекулярная масса и конформационная гибкость; способность к межмолекулярным взаимодействиям; заряд молекулы и положение изоэлектрической точки [1, 7].

Пенообразующая способность водного раствора концентрата молочной сыворотки существенно зависит от величины рН. В кислой среде (рН 3,0–5,0) наблюдается минимальное пенообразование, что связано с приближением белков сыворотки к изоэлектрической точке и снижением их растворимости и поверхностной активности. При повышении рН до нейтральных значений (6,5–7,5) пенообразование возрастает, достигая максимума в слабощелочной

области (рН 8,0–9,0), где молекулы белков приобретают отрицательный заряд, усиливается их разворачивание на межфазной поверхности и стабилизация пленок пузырьков. Дальнейшее увеличение рН выше 10,0 приводит к снижению пенообразующей способности вследствие денатурации белков. Таким образом, регулирование рН позволяет целенаправленно изменять пенообразующие свойства концентратов молочной сыворотки при разработке пищевых систем [9].

Среди факторов, повышающих пенообразующую способность и стабильность пены яичного белка, отмечают дезагрегацию мицеллярных сплетений плотного белка, понижение рН, введение кислот и кислых солей, а также обессахаривание — в частности сбраживание глюкозы, содержащейся в нативном яичном белке. Отдельного внимания заслуживают пенообразующие свойства конъюгатов овальбумина и цитрусового пектина, образующихся в ходе реакции Майяра: рост их гидрофобности обеспечил повышение пенообразующей способности до 66 % и стабильности пены до 81 %, что свидетельствует о перспективности таких конъюгатов в качестве пенообразователей для пищевой промышленности [10].

В сравнительных работах изучены физико-химические и функциональные свойства белков различного происхождения — молочного, сывороточного, горохового, кукурузного, соевого, овсяного, конопляного, белка облепихи и муки из вешенки — относительно пшеничной муки. Пенообразующая способность и стабильность пены при этом существенно зависят от источника белка: от полного отсутствия пены у конопляного белка до 91,5 % у молочного. По результатам этих исследований обоснована возможность использования изолятов белка из кукурузного жмыха, семян конопля и льна как источников пищевого белка и пенообразователей [11–13].

Различные фракции растительных белков (альбумины, глобулины, проламины и глютенины) неодинаково участвуют в пенообразовании. Исследован потенциал использования разных фракций пшеничных белков, растворимых (альбумины и глобулины) и нерастворимых в воде (глиадины и глютенины) для стабилизации пищевых пен. Наибольшей пенообразующей способностью обладают альбумины и глобулины — водорастворимые белки с невысокой молекулярной массой, способные быстро диффундировать к поверхности раздела и эффективно снижать поверхностное натяжение. Спирторастворимые белки: проламины (глиадин)

и глютенины имеют высокую молекулярную массу, что затрудняет адсорбцию на межфазной границе и уменьшает пенообразующую способность. Они составляют основу белкового комплекса пшеничной муки и образуют при гидратации клейковину [8, 14]. Установлена возможность физической и биохимической модификации глютеинов для улучшения их растворимости и использования в растительном безе и мороженом [15]. Показано, что механизмы формирования и стабилизации пены белков пшеницы определяются совместным действием двух фракций: растворимая в этаноле обладает высокой поверхностной активностью и пенообразующей способностью, благодаря возможности создавать высокое поверхностное давление на границе раздела воздух-вода, а нерастворимая в этаноле обладает высокой стабильностью пены благодаря высокой скорости адсорбции на границе раздела воздух-вода [16].

Пшеничная мука проявляет умеренную пенообразующую способность с низкой устойчивостью пен (от 13 до 39 мин). Показано, что пенообразующая способность пшеничной муки в 1,8 раза ниже, чем у ржаной, что ограничивает ее самостоятельное использование в качестве пенообразователя [14]. Значительно выше пенообразующие свойства белковой муки из пшеничных отрубей (55%, при стабильности пены 83%) [2]. Исследовалось влияние добавления пищевых зародышей пшеницы (в количестве 2, 4 и 6% от массы муки) на структурно-механические свойства теста, реологические, органолептические и физико-химические показатели хлеба. Показано, что добавление зародышей пшеницы ведет к снижению формоудерживающей способности, что связано с содержанием в них глутатиона, который разжижает тесто. Оптимальной признана дозировка в 2% зародышей пшеницы: такой хлеб имеет хорошие органолептические показатели, объем и пористость на уровне контроля [17].

Установлено, что пенообразование в тесте непосредственно связано с количеством и качеством клейковины: чем выше содержание клейковины и чем она крепче, тем выше водопоглотительная способность муки и лучше формируется структурный каркас, удерживающий пузырьки углекислого газа. Управление качеством клейковины — ключевой фактор регулирования пенообразующей способности теста и структуры готовых изделий [18].

Разработана рецептура и технология производства бездрожжевого хлеба на хмелевой закваске. В отличие от традиционного хлеба, разрыхление теста достигается за счет

молочнокислого брожения в закваске: содержащиеся в шишках хмеля соединения создают питательную среду для развития молочнокислых бактерий, которые продуцируют углекислый газ, формирующий поры [19].

Среди растительных белков наиболее высокую пенообразующую способность демонстрирует белок пшеничного глютена (102 %) и маша (89 %). При этом пенообразующая способность белков положительно коррелирует с гидрофобностью их поверхности и содержанием свободных сульфгидрильных групп [20].

В белках ржаной муки повышенная способность к пенообразованию и набуханию с образованием вязких коллоидных растворов по сравнению с пшеничной благодаря высокому содержанию водорастворимых пентозанов – в 2 раза больше, и клетчатки – в 11 раз больше, чем в пшеничной муке. Пентозаны ржи обладают высокой гидрофильностью и способны увеличивать свой объем в присутствии воды в 8 раз, формируя вязкие структуры и выступая в роли стабилизаторов пены, повышая вязкость дисперсионной среды в ржаной муке. Важную роль играет большое содержание альбуминовой фракции в ржаной обдирной муке, что обеспечивает её преимущество перед пшеничной на 25% в качестве пенообразователя и в 5–15 раз – в качестве стабилизатора пены. Пенообразование и стабильность пены смеси ржаной и пшеничной муки возрастает с увеличением доли ржаной [8, 14].

Применение ржаной цельнозерновой муки вместо обдирной в заквасках спонтанного брожения обеспечивает более стабильное пенообразование и позволяет получать хлеб с улучшенными потребительскими свойствами и повышенной пищевой ценностью [21].

Исследовано влияние компонентного состава муки на реологические свойства теста для заварного хлеба из муки ржаной сеяной, пшеничной 1 сорта и солода ржаного ферментированного. Показано, что увеличение доли ржаной муки и солода приводит к ослаблению клейковинного каркаса, который удерживает газовую фазу теста, улучшается структура мякиша при хранении, увеличивается пенообразование белков муки и повышается газообразование теста [22].

Между количеством белка и пенообразующей способностью ржаной обдирной муки и муки из зародышей кукурузы выявлена прямая связь [23], тогда как взаимосвязь со стабильностью пены носит более сложный характер: проба с наибольшим содержанием белка обладала наибольшей пенообразующей способностью,

а с наименьшим — наименьшей, но при этом наибольшей стабильностью пены [24, 25, 26]. Существенную роль играют и полисахариды, причём их влияние на пенообразование в тесте зависит от злаковой культуры: арабиноксиланы ржи укрепляют межфазные плёнки и повышают стабильность пены, тогда как в пшенице они, напротив, ослабляют пенообразующие свойства; в овсяном тесте пенообразование определяется главным образом липидами. Управлять пенообразованием и стабильностью пены белков муки из смеси злаковых культур (пшеницы, ржи и овса) позволяет ферментативная обработка некрахмалистых полисахаридов [27]. Прямая взаимосвязь пенообразующей способности с числом падения муки при этом не обнаружена, однако измерение данного показателя признано важным при оценке технологических свойств ржаной обдирной муки, особенно при её использовании в производстве жидких заквасок для хлеба [28]. Положительное влияние на пенообразующие свойства оказывает и предварительное прогревание кукурузной муки при её совместном применении с яичным белком [23].

Показано, что добавление щелочи (бикарбоната натрия) улучшило качество гречневого парового хлеба, приготовленного из закваски: ускорило диффузию белков и снизило поверхностное натяжение жидкости, увеличило пенообразующую способность и устойчивость пены белков гречневой закваски [29].

Альбумин гречихи обыкновенной отличается высокими пенообразующими свойствами в диапазоне рН от 3,0 до 6,0, причём после ферментативного гидролиза они улучшаются [30]. Ферментная обработка также заметно повысила пенообразующую способность и стабильность пены жидкости, выделенной из теста гречнево-пшеничного парового хлеба, способствуя стабилизации газовых ячеек, улучшению структуры мякиша и повышению качества хлеба [31].

Что касается рисового глютенина, его пенообразующие и эмульгирующие свойства улучшаются при фибрилляции — образовании нерастворимых агрегатов в процессе денатурации [32]. Повысить растворимость, эмульгирующую способность и пенообразующие свойства этого белка позволяет и направленная модификация — за счёт контроля рН и температуры, добавления полисахаридов и фенольных соединений с формированием заданных структур (наночастиц, комплексов и конъюгатов) [33]. Ультразвуковая обработка улучшает способность рисового белка к самосборке, способствуя образованию длинных гибких фибрилл. В результате модификации значительно

повысились растворимость, пенообразующая способность и стабильность пены у большинства белковых фракций риса у глютелиновых фибрилл) [34]. Показано, что наибольшей поверхностной гидрофобностью и пенообразующей способностью обладает белок риса на средней молочной стадии спелости [35].

Показано, что мука из **бобовых** культур (сои, нута и чечевицы) обладает более высокой маслоудерживающей, пенообразующей способностью и стабильностью пены чем из злаковых (пшеницы, овса и ячменя). Наибольшее количество белка отмечено у муки из нута [36].

Пенообразующие свойства соевых белков значительно зависят от степени очистки и способа получения. Соевый изолят с содержанием белка 86% демонстрирует пенообразующую способность, сопоставимую с показателями белковой муки из пшеничных отрубей [37]. Изолят соевого белка обладает способностью формировать твердые, упругие и эластичные гели с высокой пенообразующей способностью, которая при снижении максимальной плотности пены практически не изменилась после хранения в течение 224 сут. в условиях повышенной температуры и влажности [5]. Установлено, что пневмокласификация (выделение обогащенных белком фракций) муки бобовых культур позволяет повысить ее пенообразующую способность [37]. Показано, что полученный при удалении небелковых компонентов гороховой муки и частичной поверхностной денатурацией пенный осадок обладает улучшенными пенообразующими свойствами по сравнению с исходной мукой [38]. Образование белково-пектиновых комплексов (изолят соевого белка-пектин) приводит к агрегации и выпадению осадка, что ведет к некоторому снижению пенообразующей способности системы, одновременно увеличивая показатель стабильности пены [39].

Установлено, что ферментативная обработка темно-синих бобов с использованием фермента протеазы приводит к частичной денатурации белковых молекул, снижению их поверхностной гидрофобности и пенообразующей способности [40].

Исследованы функциональные свойства белков, выделенных из различных бобовых культур (чечевицы, нута, гороха, сои, бобов фава) методом щелочной экстракции. Установлено, что эти белки обладают высокой водо- и маслоудерживающей способностью, а их эмульгирующие и пенообразующие свойства достигают максимума при экстремальных значениях pH (2,0 и 10,0). Наивысшую пенообразующую способность (56,7%) продемонстрировал белок, выделенный из бобов фава [41].

Пенообразующие свойства белка бобов мунг напрямую зависят от способа его фракционирования: глобулины образуют слабую и нестабильную пену, тогда как альбумины и белковые коллоиды формируют жесткие межфазные границы и за счёт прочной поверхностной плёнки обеспечивают высокую стабильность, что делает их перспективными растительными пенообразователями [42].

Исследован углеводно-амилазный комплекс зерновой и псевдозерновой муки: ржаной, ячменной, рисовой, гречневой и пшеничной. Установлено, что крахмал ячменной, гречневой и пшеничной муки обладает высокой термостойкостью. Крахмал рисовой муки при нагревании дает жидкую желатинизированную массу и обладает низкой термостойкостью. Ржаная мука имеет низкую активность ферментов по отношению к термостабильным крахмалам. Крахмалы зерновой и псевдозерновой муки требуют более длительного времени для разжижения по сравнению с ржаной мукой [43].

Исследованы свойства изолятов белка из псевдозерновых культур: киноа, гречихи и амаранта. Показано, что наибольшей пенообразующей способностью и стабильностью пены обладают белки амаранта, чуть ниже – киноа, наименьшей – гречихи. Установлена зависимость пенообразующей способности от размера частиц (чем крупнее частицы, тем ниже пенообразующая способность) и гидрофобных свойств белков (чем больше гидрофобные участки белков, тем выше пенообразующая способность). Повышение содержания фенольных соединений ведет к уменьшению пенообразующей способности белков [44].

Установлено, что свойства пен из альгината натрия (0,5–1,5%), изолята сывороточного белка (0,2–0,6%) и экстракта солодки (0,1–0,5%) определяются взаимодействием их компонентов. Синергетическое действие компонентов обеспечивает псевдопластичность дисперсий с высокой вязкостью, а также выход альгината и лигнина на границу раздела фаз. Полученные пены характеризуются очень высокой степенью вспенивания, физической стабильностью (до 40,8 ч), преобладанием упругих свойств над вязкими, а также антиоксидантной активностью (до 56,5%), что делает их перспективной основой для создания функциональных аэрированных продуктов [45].

Подтверждена возможность использования нетрадиционных растительных пенообразователей (растений семейств гвоздичных, аралиевых, бобовых и розоцветных) в технологии сладких десертов функционального назначения

(зефир, пастила, халва, сбивные массы) в комбинациях с натуральными стабилизаторами-гидроколлоидами (пектиновые вещества, агар-агар) для получения стабильной пенной структуры [46].

Пенообразующая способность белков полбяной муки определяется главным образом количеством и качеством клейковины, а также реологическими свойствами теста. Наилучшие хлебопекарные свойства характерны для муки с высоким содержанием клейковины: она формирует упругий клейковинный каркас с хорошей пенообразующей и газодерживающей способностью. Высокое число падения указывает на низкую активность амилолитических ферментов и способствует стабильности пенной структуры при несколько меньшей хлебопекарной силе [47].

Исследовано влияние добавок сорговой муки на реологические свойства теста и качество хлеба из пшеничной муки высшего сорта. Отмечено улучшение пористости хлеба из композитной смеси пшеничной и сорговой муки на 1,7%, а также увеличение выхода по сравнению с контролем [48]. Установлено, что при добавлении амарантовой муки и муки сорго в количестве 5% от массы композитной смеси происходит усиление газообразования и пенообразования в тесте, что позволяет сократить производственный цикл и улучшить качество готовых изделий [49, 50]. При замене пшеничной муки на тритикалевую муку и отруби (60% тритикалевой муки + 15% отрубей + 25% пшеничной муки) отмечаются повышение пенообразующей и газодерживающей способности, а также стабильности пены белков мучного композита [51]. Исследована возможность использования порошка кипрея узколистного (иван-чая) и арахисовой муки в рецептуре хлеба из композита ржаной и пшеничной муки на закваске. Установлено, что замена смесью данных компонентов 5–10% мучного композита улучшает органолептические и физико-химические показатели, повышает пенообразующие свойства белков муки и пористость хлеба [52].

Установлено, что при добавлении суспензии свекольного порошка в композитную смесь пшеничной муки первого сорта и ржаной сеяной муки (70:30) в количестве 5% происходит значительная активация дрожжей, усиление процессов пенообразования и газообразования в 2–3 раза по сравнению с пшеничной мукой. Показано влияние предварительной активации дрожжей суспензией порошка (15 мин при 30° С) на ускорение газообразования и пенообразования в 5–11 раз по сравнению с контролем [7, 53].

Исследована возможность использования различных видов муки из нетрадиционных источников (арахисовой, фундучной, соевой, чечевичной, миндальной и черемуховой) в технологии мучных кондитерских изделий функционального назначения. Показано, что данные виды муки содержат большое количество белка (от 15% в фундучной до 36,5% в чечевичной), а также пектиновых веществ, что обуславливает их способность формировать устойчивые пенные структуры. Белки бобовых культур (соя, чечевица) обладают высокой пенообразующей способностью благодаря хорошей растворимости и способности к быстрой адсорбции на межфазной границе. Черемуховая мука способствует стабилизации пены благодаря высокому содержанию пектиновых веществ, за счёт повышения вязкости дисперсионной среды и образования белково-полисахаридных комплексов, которые замедляют дренаж жидкости и коалесценцию газовых пузырьков. Миндальная и фундучная мука имеют сложный механизм пенообразующей способности: содержащиеся в них жиры до снижают пенообразующую способность, разрушая пену, однако при сочетании с эмульгаторами они могут способствовать формированию более однородной структуры [54, 55].

Исследована возможность использования муки из экструдата люпина сорта Дега в качестве высокобелкового обогащающего ингредиента для хлебобулочных изделий из модельных смесей пшеничной муки высшего сорта с люпиновой мукой. С увеличением дозировки люпиновой муки снижается количество клейковины и пенообразующая способность муки, повышается кислотность и зольность смесей, при этом качество клейковины улучшается. Установлена оптимальная дозировка экструдата люпина сорта Дега – 10% от массы мучной смеси. Использование нетрадиционных видов муки позволяет повысить пищевую ценность готовых изделий, а также целенаправленно регулировать структурно-механические свойства теста, включая газодержание и пористость [56].

Показано различие механизмов межфазных взаимодействий (масло-вода и воздух-вода), определяющих пенообразующие и эмульгирующие свойства муки и белкового концентрата из семян пажитника (кориндра) и соевой муки. При удалении небелковых компонентов для получения белкового концентрата из семян пажитника повышается его пенообразующая способность на границе масло-вода, но не оказывается аналогичного эффекта на границе воздух-вода, что указывает на селективную адсорбцию определенных белковых фракций в зависимости от типа границы раздела [57].

Рассмотрены технологии получения растительного белка с улучшенными пенообразующими и эмульгирующими свойствами из шрота амаранта [58] и льняных гидролизатов [59] с помощью комбинированного метода ферментативного гидролиза препаратами протосубтилин (с предварительной ультразвуковой обработкой субстрата) и панкреатин. Показано, что ферментативный гидролиз способствует улучшению стабильности эмульсии, пенообразующей способности и стабильности пены, а также снижению аллергенности белков [58, 59].

Пенообразующие свойства муки из семян кориандра существенно зависят от pH среды: максимальная пенообразующая способность белков отмечена при pH 4,0 и 5,0 [57].

Исследованы нетрадиционные источники белка (насекомые, микроорганизмы, культивируемое мясо), их химический состав, нутрицевтический потенциал и способы извлечения, а также возможности применения в хлебопекарной, мясной и рыбной промышленности. Показано, что такие белки обладают большим потенциалом для укрепления продовольственной безопасности, удовлетворения глобального спроса на высокобелковые продукты и решения задач устойчивого развития [60].

Мука из съедобных насекомых — перспективный функциональный ингредиент. Её концентраты уступают соевым и сывороточным белкам по пенообразующей способности, но демонстрируют очень высокую стабильность пены, значительно превосходящую традиционные растительные и молочные аналоги [61].

Аквафаба (отвар) из бобовых культур обладает высокими пенообразующими, эмульгирующими, желеобразующими и загущающими свойствами, которые обусловлены присутствием в её составе альбумина, полисахаридов и сапонинов. Белки отвечают за пенообразующую способность, полисахариды обеспечивают стабильность пены, а сапонины облегчают формирование пузырьков воздуха и способствуют их устойчивости. Пенообразующая способность аквафабы напрямую зависит от содержания белка, вида сырья и параметров технологического процесса. Установлено, что аквафаба из консервированных экстрактов из чечевицы и нута обладает пенообразующей способностью, сопоставимой с яичным белком [62]. Аквафаба из красной фасоли обладает более пенообразующей способностью, а из белой — более высокой стабильностью пены [63]. Обоснована возможность замены яичного белка на аквафабу из зеленой чечевицы в мучных кондитерских изделиях и концентрат сывороточных белков (КСБ-80)

в сбивных изделиях специального назначения для детского, диетического, спортивного и геронтологического питания. Благодаря содержанию альбуминов и глобулинов, крахмала и пектиновых веществ аквафаба из зеленой чечевицы имеет высокие пенообразующие свойства, схожие с яичным белком [64, 65]. Разработаны оптимальные параметры белкового раствора КСБ-80, обладающего пенообразующей способностью раствора выше, чем у сухого и нативного яичного белка. Показано увеличение пенообразующей способности и стойкости пены при снижении pH (подкислении) среды [9, 66].

Разработан вид безмолочного мороженого на основе аквафабы с крымскими специями (куркума, розмарин и тимьян) с высокой стабильностью пены и устойчивостью к таянию при комнатной температуре. Установлена прямая зависимость пенообразующей способности аквафабы от содержания белка [67].

Исследованы свойства растительных напитков для капучино с маркировкой *Barista* (соевый, овсяный, миндальный, фундучный, кокосовый, соево-миндальный, рисово-фундук-овый, кокосово-соевый, соево-банановый, рисово-конопленный) в сравнении с коровьим молоком. Показана обратную зависимость между содержанием жиров и пенообразующей способностью белков. По пенообразующей способности и стабильности пены растительные напитки оказались близки к коровьему молоку при использовании перемешивания с помощью впрыскивания пара, но уступали ему при механическом перемешивании [68].

В настоящее время происходит усиление тенденции перехода от животных к растительным пенообразователям в связи с их технологическими преимуществами: снижение калорийности, высокая технологичность, хранимоспособность и экономичность производства, так гидролизаты альбумина и глобулина показали более низкую водоудерживающую, жирудерживающую, эмульгирующую и пенообразующую способность по сравнению с негидролизованной изолятами [69]. Установлено, что 90-минутный гидролизат альбумина не является аллергенным. При анализе смесей альбумина с гидролизатами белков разных видов муки подобраны соотношения, которые улучшают свойства: с овсяной (1:5) — жирудерживающие, с кукурузной (1:5) — водо- и жирудерживающие, с льняной (1:3) — жирудерживающие и эмульгирующие. Показано, что смеси гидролизатов яичного альбумина и растительных белков обладают улучшенными функциональными свойствами и сбалансированным аминокислотным составом [7].

Исследованы свойства комбинированных гидролизатов из соевых и кукурузных белков. Показано, что разные фракции гидролизатов могут применяться в зависимости от требуемых свойств: низкомолекулярные – за счет биологической активности (антиоксидантной, антигипертензивной и антидиабетической), высокомолекулярные – за счет способности к улучшению текстуры и увеличению стабильности пен [70].

Пенообразующие свойства белков муки можно направленно улучшать, регулируя режимы термообработки и физически модифицируя их структуру. Так, микрофлюидизация белков муки из тыквенных семечек повышает их поверхностную гидрофобность, что значительно — в 7,5 раза —

улучшает пенообразующие свойства по сравнению с необработанным сырьём [71]. При радиочастотном нагреве белков рисовой муки до температуры 34–72 °С, соответствующей степени желатинизации (СЖ) от 15% до 90% проявляется сложная зависимость: при СЖ 45–60% (50–60 °С) проявлялась наибольшая пенообразующая способность, которая значительно ухудшалась при увеличении СЖ выше 75% (65 °С) [72].

Результаты сравнительной оценки пенообразующей способности и стабильности пены различных видов муки и белковых концентратов представлены в таблице 1.

Таблица 1.
Пенообразующая способность (ПОС) и стабильность пены (СП) различных видов муки и белковых концентратов

Table 1.
Foaming ability (PIC) and foam stability (SP) of various types of flour and protein concentrates

Наименование, источник Name, source	Массовая доля белка, % Mass fraction of protein, %	ПОС, %	СП, %
Белки животного происхождения Animal proteins			
Яичный белок нативный, [6] Native egg white, [6]	10–12	352	73–89
Яичный белок сухой, [7] Dried egg white, [7]	82–85	293	69–80
Сывороточный белок (концентрат), [9] Whey protein (concentrate), [9]	70–80	50	50
Белки зерна Grain proteins			
Пшеничная мука (в/с), [15] Wheat flour (premium grade), [15]	10–12	20–35	13–39
Пшеничная мука (1 с), [47] Wheat flour (1 s), [47]	10–11	104	16–20
Белковая мука из пшеничных отрубей, [2] Wheat bran protein flour, [2]	42	55–76	52–83
Ржаная мука, [14] Rye flour, [14]	8–12	187	95
Кукурузная мука, [23] Corn flour, [23]	7–9	2–14	15
Рисовая мука, [33] Rice flour, [33]	6–8	50–60	25
Гречневая мука, [31] Buckwheat flour, [31]	11–13	40–60	30
Белки бобовых Legume proteins			
Белковый концентрат гороха, [38] Pea protein concentrate, [38]	50–60	70–90	20
Соевая мука, [37] Soy flour, [37]	39	56	38
Соевый изолят, [39] Soy isolate, [39]	86	113	77
Аквафаба из чечевицы, [64] Lentil aquafaba, [64]	1–2	150	55
Аквафаба из фасоли, [65] Bean aquafaba, [65]	1–2	150	40
Белки псевдозерновых и нетрадиционных источников Proteins from pseudocereals and non-traditional sources			
Мука из амаранта, [58] Amaranth flour, [58]	14–16	50–70	85
Мука из семян кориандра (пажитника), [57] Coriander seed flour (fenugreek), [57]	20–25	25–35	25
Белки масличных культур Oilseed proteins			
Мука из тыквенных семечек, [71] Pumpkin seed flour, [71]	30–40	46	86
Мука из тыквенных семечек (после микрофлюидизации), [71] Pumpkin seed flour (microfluidized), [71]	30–40	150–200	86
Льняная мука, [59] Flaxseed flour, [59]	30–35	44	35
Льняной белковый концентрат, [59] Flaxseed protein concentrate, [59]	59–64	44	90
Гидролизат льняной муки, [59] Flaxseed meal hydrolysate, [59]		50–70	55
Клейковина* Gluten*			
Пшеничная клейковина, [15] Wheat gluten, [15]	81	65	43

Прим.: *таблица составлена авторами, ** не основной материал

Как показывают данные таблицы 1, пенообразующую способность белков растительного происхождения можно расположить по убыванию в ряд: ржаная мука (187%, максимум), аквафаба из чечевицы и фасоли (150%), мука из тыквенных семечек после микрофлюидизации (150–200%), соевый изолят (113%), пшеничная мука 1 сорта (104%), белковый концентрат гороха (70–90%), пшеничная клейковина (65%),

белковая мука из пшеничных отрубей (55–76%), соевая мука (56%), рисовая мука (50–60%), гидролизат льняной муки (50–70%), мука из амаранта (50–70%), гречневая мука (40–60%), мука из тыквенных семечек (46%), льняная мука (44%), льняной белковый концентрат (44%), пшеничная мука высшего сорта (20–35%), мука из семян кориандра пажитника (25–35%), кукурузная мука (2–14%).

Стабильность пены белков растительного происхождения можно расположить по убыванию в ряд: ржаная мука (95%), льняной белковый концентрат (90%), мука из тыквенных семечек (86%), мука из тыквенных семечек после микрофлюидизации (86%), мука из амаранта (85%), белковая мука из пшеничных отрубей (52–83%), соевый изолят (77%), аквафаба из чечевицы (55%), гидролизат льняной муки (55%), пшеничная клейковина (43%), аквафаба из фасоли (40%), соевая мука (38%), льняная мука (35%), гречневая мука (30%), рисовая мука (25%), мука из семян кориандра пажитника (25%), белковый концентрат гороха (20%), пшеничная мука 1 сорта (16–20%), кукурузная мука (15%), пшеничная мука высшего сорта (13–39%).

Наибольшую пенообразующую способность и стабильность пены проявляют ржаная мука (ПОС 187%, СП 95%), мука из тыквенных семечек после микрофлюидизации (ПОС 150–200%, СП 86%), аквафаба из чечевицы (ПОС 150%, СП 55%) и аквафаба из фасоли (ПОС 150%, СП 40%), соевый изолят (ПОС 113%, СП 77%), а также льняной белковый концентрат (ПОС 44%, СП 90%) и мука из амаранта (ПОС 50–70%, СП 85%). При этом ржаная мука лидирует сразу по обоим показателям, сочетая высокую пенообразующую способность и стабильность пены.

Пенообразующая способность белков муки также зависит от взаимодействия с другими ингредиентами пищевых систем (соль, сахар, липиды и гидроколлоиды), причем при увеличении количества липидов она снижается, а взаимодействие с гидроколлоидами имеет сложный характер: уменьшается пенообразующая способность системы и одновременно увеличивается стабильность пены.

Для большинства исследованных видов муки наблюдается увеличение пенообразующей способности и стабильности пены с ростом концентрации белка и снижением рН среды. Максимальные значения для ржаной муки при рН 8, минимальные – при рН 7, промежуточные значения – и при рН 4–6 [23]. Для муки из семян кориандра максимальная пенообразующая способность белков муки при рН 4,0 и 5,0 [68].

Заключение

Проведенный анализ научной литературы позволяет сделать вывод о том, что ключевую роль в формировании пенообразующих свойств и стабилизации пен белков традиционных и нетрадиционных видов муки играют водорастворимые белковые фракции – альбумины,

которые обеспечивают быструю адсорбцию на границе раздела фаз. Глобулины, хотя и уступают им по скорости диффузии и пенообразующей способности, вносят вклад в стабилизацию пены за счёт формирования более прочных межфазных слоев.

Среди растительных источников наибольшей пенообразующей способностью отличаются: белки ржаной муки, из пшеничных отрубей, аквафаба и соевый изолят. Наибольшая устойчивость пены у белков ржаной, амарантовой муки, концентрата льна и муки из семян тыквы.

Потенциал применения в пищевых системах показали аквафаба из бобовых культур и мука из съедобных насекомых. Льняной белковый концентрат при средних показателях пенообразующей способности за счет наличия камедей-растворимых полисахаридов, увеличивающих вязкость среды, отличается большой стабильностью пены.

Применение физических методов модификации (микрофлюидизация и контролируемый радиочастотный нагрев), позволяет увеличить пенообразующую способность белков муки. Ферментативный гидролиз увеличивает пенообразующую способность и снижает аллергенность растительных белков (льняных, амарантовых, соевых).

Пенообразующая способность и стабильность пены зависят от кислотности среды: у белков ржаной муки пенообразующая способность улучшается при рН 8, у остальных рассмотренных видов муки — при рН 4–7. Для большинства исследованных видов муки повышение концентрации белка и снижение рН сопровождаются ростом как пенообразующей способности, так и стабильности пены. При этом пенообразующая способность обратно зависит от содержания жиров, тогда как на стабильность пены жиры способны оказывать прямое положительное влияние. Гуаровая, ксантановая камеди и пектиновые вещества эффективно повышают стабильность пен белков муки, что особенно ценно для пищевой промышленности при необходимости сохранять воздушные структуры в течение длительного времени.

Результаты обзорного исследования позволяют выбрать перспективные направления для дальнейшей разработки и оптимизации технологии производства бездрожжевого хлеба за счет повышения пенообразующей способности и стабильности пены белков муки и возможности их синергического действия с пектиновыми веществами.

Литература

- 1 Oduse K., Arogundade L.A., Deng Y., et al. Electrostatic complexes of whey protein and pectin as foaming and emulsifying agents // *International Journal of Food Properties*. 2020. V. 20. № sup3. P. S3027–S3041. doi: 10.1080/10942912.2017.1396478
- 2 Куликов Д.С., Королев А.А., Панкратов И.В. Анализ современных способов получения гидролизатов и биоактивных пептидов из белковых компонентов пшеницы // *Пищевая промышленность*. 2025. № 4. С. 88–94. doi: 10.52653/PPI.2025.4.4.016
- 3 Barros J.H.T., de Souza C.K., Telis-Romero J., et al. Non-thermal emerging technologies as alternatives to chemical additives to improve the quality of wheat flour for breadmaking: a review // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2023. V. 63. № 11. P. 1612–1628. doi: 10.1080/10408398.2021.1966735
- 4 Кузнецова Л.И., Бурыкина М.С., Парахина О.И., Нутчина М.А. Анализ качества муки ржаной обдирной, вырабатываемой мукомольными предприятиями различных регионов России в 2020 году // *Хлебопечение России*. 2021. № 2. С. 36–43.
- 5 Ma H.F., Wu W., Chen L., et al. Structural and functional properties of soy protein isolates from different cultivars // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025. V. 300. P. 146748. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2025.146748
- 6 Dwivedi S.K., Issar K., Tiwari V. Nutrient requirements in health and disease // *Handbook of Nutraceuticals: Science, Technology and Engineering*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2026. P. 151–175. doi: 10.1007/978-3-031-65467-5_7
- 7 Echeverria-Jaramillo E., Jaramillo-García J.D., Fernández-López J., et al. Functional properties of protein fractions from gentle membrane separation of green biomass (legume grass) compared to traditional animal- and plant-based proteins // *Future Foods*. 2025. V. 11. P. 100740. doi: 10.1016/j.fufo.2025.100740
- 8 Ikram A., Saeed F., Afzaal M., et al. A comprehensive review on biochemical and technological properties of rye (*Secale cereale* L.) // *International Journal of Food Properties*. 2023. V. 26. № 1. P. 2212–2228. doi: 10.1080/10942912.2023.2236321
- 9 Попов В.Н., Плотнокова И.В., Магомедов Г.О., и др. Комплексная оценка пенообразующих свойств концентрата сывороточных белков для получения продукции специального назначения // *Пищевая промышленность*. 2020. № 8. С. 42–47. doi: 10.24411/0235-2486-2020-10084
- 10 Zhang S., Liu Y., Wu W. Study on the structural characteristics and foaming properties of ovalbumin – Citrus pectin conjugates prepared by the Maillard reaction // *Foods*. 2024. V. 13. № 22. P. 3542. doi: 10.3390/foods13223542
- 11 Stamatie G.D., Zaharia R., Tofană M., et al. Nutritional and functional properties of some protein sources // *AgroLife Scientific Journal*. 2021. V. 10. № 1. P. 185–192.
- 12 Premkumar J., Ravi R., Roy S., et al. Corn protein isolate: Characteristic analysis, functional properties, and utilization in beverage formulation // *Journal of Food Processing and Preservation*. 2022. V. 46. № 2. P. e16257. doi: 10.1111/jfpp.16257
- 13 Яковлева А.А. Перспективы использования семян конопли и льна в качестве источника пищевого белка // *Технические культуры. Научный сельскохозяйственный журнал*. 2024. № 2(4). С. 3–9.
- 14 Qazanfarzadeh Z., Kadivar M., Shekarchizadeh H., et al. Functional properties of rye prolamins (Secalins) and their improvement by protein lipophilization through capric acid covalent binding // *Foods*. 2021. V. 10. № 3. P. 515. doi: 10.3390/foods10030515
- 15 Janssen F., Monderde V., Wouters A.G.B. Relevance of the air–water interfacial and foaming properties of (modified) wheat proteins for food systems // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2023. V. 22. № 3. P. 1517–1554. doi: 10.1111/1541-4337.13147
- 16 Zhao M., Lan Y., Zhang H., et al. Comparative study on the foam and air-water interface properties of ethanol-soluble and non-ethanol components in wheat aqueous phase protein // *Food Hydrocolloids*. 2024. V. 150. P. 109700. doi: 10.1016/j.foodhyd.2024.109700
- 17 Алмасова М.Г., Тедеева Ф.Л. Влияние зародышей пшеницы на структурно-механические свойства теста и качество готового хлеба // *Дни науки СОГУ 2023: мат. науч. конф. по итогам работы факультета химии, биологии и биотехнологии СОГУ, Владикавказ, 23 апреля 2024 г. Владикавказ: СОГУ, 2024. С. 18–31.*
- 18 Oyeyinka S.A., Basseyy I.A.V. Composition, functionality, and baking quality of flour from four brands of wheat flour // *Journal of Culinary Science & Technology*. 2025. V. 23. № 1. С. 87–107. doi: 10.1080/15428052.2023.2254821
- 19 Говядова И.А., Старкова А.В., Ковалева А.Е., Пьяникова Э.А. Разработка рецептуры и технологии производства бездрожжевого цельнозернового хлеба // *Пищевая индустрия в современных условиях: тренды и инновации: сб. науч. ст. Междунар. науч.-практ. конф., Орел, 19 апреля 2023 г. Орел: Орловский ГАУ, 2023. С. 53–58.*
- 20 Zhang X., Xu Y., Li J., et al. Interfacial and foaming properties of plant and microbial proteins: Comparison of structure-function behavior of different proteins // *Food Chemistry*. 2025. V. 463. P. 141431. doi: 10.1016/j.foodchem.2024.141431
- 21 Бочкарева З.А., Пчелинцева О.Н., Белякова К.Н., Сагандыкова С.К. Сравнительная оценка показателей ржаного хлеба на закваске спонтанного брожения // *Ползуновский вестник*. 2022. № 1. С. 23–30. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.01.003
- 22 Iuga M., Mironeasa S., Codină G.G., et al. Impact of dairy ingredients on wheat flour dough rheology and bread properties // *Foods*. 2020. V. 9. № 6. P. 828. doi: 10.3390/foods9060828
- 23 Шевчук Е.В., Долгакова М.А. Исследование влияния предварительного прогревания муки амарантовой, кукурузной и рисовой на пенообразующие свойства сырого яичного белка // *Техника и технология пищевых производств: тез. докл. XI Междунар. науч. конф. Могилев: МГУП, 2019. С. 130.*
- 24 Бурыкина М.С., Кузнецова Л.И., Нутчина М.А. Исследование взаимосвязи количества белка в ржаной и пшеничной муке с ее технологическими свойствами // *Виноградарство и виноделие*. 2023. Т. 52. С. 69–71.
- 25 Кузнецова Л.И., Бурыкина М.С., Савкина О.А., и др. Исследование качества ржаной обдирной муки и ее пенообразующей способности // *Хлебопечение России*. 2022. № 1. С. 47–50. doi: 10.37443/2073-3569-2022-1-1-47-50
- 26 Vani B., Zayas J.F. Foaming properties of selected plant and animal proteins // *Journal of Food Science*. 1995. V. 60. № 5. P. 1025–1028. doi: 10.1111/j.1365-2621.1995.tb06293.x
- 27 Janssen F., Pauly A., Rombouts I., et al. The role of non-starch polysaccharides in determining the air-water interfacial properties of wheat, rye, and oat dough liquor constituents // *Food Hydrocolloids*. 2020. V. 105. P. 105771. doi: 10.1016/j.foodhyd.2020.105771
- 28 Дерканосова Н.М., Стахурлова А.А., Василенко О.А. Прогнозирование качества хлебобулочных изделий на основе исследования реологических свойств модельных смесей // *Товаровед продовольственных товаров*. 2024. № 7. С. 404–407. doi: 10.33920/igt-01-2407-04

- 29 Song M.K., Guo X.N., Zhu K.X. Alkali-induced protein structural, foaming, and air–water interfacial property changes and quantitative proteomic analysis of buckwheat sourdough liquor // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2024. V. 72. № 27. P. 15387–15397. doi: 10.1021/acs.jafc.4c03210
- 30 Ninomiya K., Abe Y., Matsumura Y., et al. Physicochemical and functional properties of buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) albumin // *Future Foods*. 2022. V. 6. P. 100178. doi: 10.1016/j.fufo.2022.100178
- 31 Song M.K., Guo X.N., Zhu K.X. Elucidating the gas cell stabilization mechanism of buckwheat-wheat steamed bread induced by transglutaminase: A focus on the foaming and air-water interfacial properties of dough liquor // *Food Hydrocolloids*. 2025. V. 159. P. 110701. doi: 10.1016/j.foodhyd.2024.110701
- 32 Li T., Wang L., Zhang X., et al. Formation, structural characteristics, foaming and emulsifying properties of rice glutelin fibrils // *Food Chemistry*. 2021. V. 354. P. 129554. doi: 10.1016/j.foodchem.2021.129554
- 33 Jiang F., Li M., Wang Y., et al. Self-assembly of rice proteins: A perspective on elevating rice protein techno-functional properties // *Trends in Food Science & Technology*. 2024. V. 151. P. 104624. doi: 10.1016/j.tifs.2024.104624
- 34 Wang D., Li X., Zhang Y., et al. Modification of rice protein and its components: Enhanced fibrils formation and improved foaming properties // *Food Hydrocolloids*. 2025. V. 158. P. 110575. doi: 10.1016/j.foodhyd.2024.110575
- 35 Li D., Zhao Y., Wang R., et al. Changes of structure and functional properties of rice protein in the fresh edible rice during the seed development // *Food Science and Human Wellness*. 2023. V. 12. № 5. P. 1850–1860. doi: 10.1016/j.fshw.2023.02.034
- 36 Stone A.K., Nosworthy M.G., Chiremba C., House J.D., Nickerson M.T. A comparative study of the functionality and protein quality of a variety of legume and cereal flours // *Cereal Chemistry*. 2019. V. 96. P. 1159–1169. doi: 10.1002/cche.10237
- 37 Урубков С.А., Королёв А.А., Смирнов С.О. Пути повышения биодоступности бобового сырья в технологии пищевых концентратов быстрого приготовления // *Современная наука и инновации*. 2019. № 3 (27). С. 111–118.
- 38 Kumar S., Brooks M.S.-L. Enrichment and recovery of pea (*Pisum sativum* L.) proteins using foam fractionation for simultaneous enhancement of their functional properties // *Separation and Purification Technology*. 2025. V. 364. Pt 3. P. 132578. doi: 10.1016/j.seppur.2025.132578
- 39 Jarpa-Parra M., Bamdad F., Wang Y., et al. Understanding the stability mechanisms of lentil legumin-like protein and polysaccharide foams // *Food Hydrocolloids*. 2019. V. 61. P. 903–913. doi: 10.1016/j.foodhyd.2016.06.026
- 40 Khan M.J., Chaudhary S., Ali A., Manickavasagam A. Enzyme-assisted extraction of navy bean protein from whole and dehulled flour: Effects on extractability, structure, and techno-functional properties // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2026. V. 337. Pt 1. P. 149476. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2026.149476
- 41 Lafarga T., Álvarez C., Villaró S., Bobo G., Aguiló-Aguayo I. Potential of pulse-derived proteins for developing novel vegan edible foams and emulsions // *International Journal of Food Science & Technology*. 2020. V. 55. P. 14286. doi: 10.1111/ijfs.14286
- 42 Yang J., Wang C., Li Y., et al. Physical, interfacial and foaming properties of different mung bean protein fractions // *Food Hydrocolloids*. 2023. V. 143. P. 108885. doi: 10.1016/j.foodhyd.2023.108885
- 43 Vitol I.S., Pankratov G.N., Meleshkina E.P. Biochemical characteristics of new varieties of flour from a binary mixture of wheat and flax // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. V. 640. № 2. P. 022050. doi: 10.1088/1755-1315/640/2/022050
- 44 Yan X., Zhu F. Structural, physicochemical and functional properties of quinoa, buckwheat and amaranth protein isolates: A comparative study // *Food Chemistry*. 2025. V. 491. P. 145301. doi: 10.1016/j.foodchem.2025.145301
- 45 Nooshkam M., Varidi M., Alkobeisi F. Bioactive food foams stabilized by licorice extract/whey protein isolate/sodium alginate ternary complexes // *Food Hydrocolloids*. 2022. V. 126. P. 107488. doi: 10.1016/j.foodhyd.2022.107488
- 46 Гармаш Н.Ю., Черевач Е.И., Левочкина Л.В., Зубова В.В. Перспективность использования нетрадиционных растительных пенообразователей в технологии сладких десертов функционального назначения // *Современные проблемы товароведения, экономики и индустрии питания: сб. ст. по итогам I заочной Междунар. науч.-практ. конф., Саратов, 30 ноября 2016 г. Саратов: ССЭИ РЭУ им. Г.В. Плеханова, 2019. С. 72–76.*
- 47 Сумина С.Р., Меркурьев Н.В. Анализ и сравнительная характеристика качества полбяной муки разных производителей // *Безопасность и качество сельскохозяйственного сырья и продовольствия 2023: мат. Всерос. науч.-практ. конф., Москва, 22–23 ноября 2023 г. М.: Сам Полиграфист, 2023. С. 507–511.*
- 48 Никонорова Ю.Ю., Волкова А.В., Макушин А.Н. Исследование реологических свойств теста и хлеба из смеси муки пшеничной высшего сорта и торговой муки // *Вестник КрасГАУ*. 2021. № 4(169). С. 155–160. doi: 10.36718/1819-4036-2021-4-155-160
- 49 Никонорова Ю.Ю., Волкова А.В. Влияние применения муки из зерна амаранта, сорго и проса на процессы брожения и созревания теста // *Евразийский союз ученых*. 2020. № 7-8 (76). С. 31–35.
- 50 Нигматзянов А.С., Кощина Е.И., Никулина Н.Ш., Заграничная А.Д. Использование амарантовой муки при производстве хлебобулочных изделий // *АПК России: образование, наука, производство: сб. ст. VII Всерос. (нац.) науч.-практ. конф. с междунар. участием, Саратов, 19–21 декабря 2023 г. Пенза: Пензенский ГАУ, 2024. С. 121–126.*
- 51 Бадамшина Е.В., Гареева И.Т., Леонова С.А., Кощина Е.И. Влияние тритикалевой муки и отрубей на показатели качества хлебных палочек // *Вестник КрасГАУ*. 2023. № 11(200). С. 298–304. doi: 10.36718/1819-4036-2023-11-298-304
- 52 Беляев А.Г., Калужских А.Г., Боев С.Г., Черкашина А.А. Изучение возможности применения продуктов кипрея узколистного и арахисовой муки в технологии ржано-пшеничного хлеба на ржаной закваске // *Товароведение, технология и экспертиза: инновационные решения и перспективы развития: мат. нац. науч.-практ. конф., Москва, 28 октября 2020 г. М.: ЗооВетКнига, 2020. С. 119–125.*
- 53 Rusina I.M., Kalesnik I.M. Investigation of quality indicators of bread sticks based on first grade wheat flour, rye flour and table beet powder // *Modern Science and Innovations*. 2022. № 2(38). P. 62–70. doi: 10.37493/2307-910X.2022.2.6
- 54 Кукаркина Ю.К., Махиянова Д.Н., Габдукаева Л.З. Различные виды муки из нетрадиционных источников сырья для расширения ассортимента мучных изделий // *Пищевая индустрия в современных условиях: тренды и инновации: сб. науч. ст. Междунар. науч.-практ. конф., Орел, 19 апреля 2023 г. Орел: Орловский ГАУ, 2023. С. 252–255.*
- 55 Ostermann-Porcel M.V., Rinaldoni A.N., Campderrós M.E. Assessment of Jerusalem artichoke as a source for the production of gluten-free flour and fructan concentrate by ultrafiltration // *Applied Food Research*. 2022. V. 2. № 2. P. 100201. doi: 10.1016/j.afres.2022.100201
- 56 Пилякина В.Д., Дерканосова Н.М., Стахурлова А.А., Василенко О.А. Исследование влияния льпина на хлебопекарные свойства мучных модельных смесей // *Международная научно-практическая конференция, посвященная памяти Василия Матвеевича Горбатова. 2024. № 1. С. 123–128.*

- 57 Ghanghas N., Prabhakar P.K., Sharma S., Mukilan M.T. Microfluidization of fenugreek (*Trigonella foenum graecum*) seed protein concentrate: Effects on functional, rheological, thermal and microstructural properties // *LWT*. 2021. V. 149. P. 111830. doi: 10.1016/j.lwt.2021.111830
- 58 Девяткин Д.И., Чугунова О.В., Панкратьева Н.А. Получение гидролизата белка шрота амаранта с повышенными технологическими свойствами // *Современные достижения биотехнологии: вектор на технологическое лидерство: мат. X Междунар. науч.-практ. конф., Ставрополь, 21–25 октября 2025 г. Ставрополь: Бюро новостей, 2025. С. 93–96.*
- 59 Красноштанова А.А., Шульц Л.В. Получение и оценка функциональных свойств белковых изолятов и гидролизатов из растительного сырья // *Химия растительного сырья*. 2022. № 4. С. 299–309. doi: 10.14258/jcprm.20220410952
- 60 Siddiqui S.A., Singh S., Bahmid N.A., et al. Unveiling the diversity of Non-conventional Proteins-From sources, extraction, technofunctionality, nutraceutical potential to advancement in food Applications-A systematic review // *Waste and Biomass Valorization*. 2025. V. 16. № 1. С. 29–51. doi: 10.1007/s12649-024-02615-5
- 61 Yisa Njowe K.B., Duodu K.G., Emmambux M.N. Techno-functional properties of protein-rich flours from different species of edible insects as affected by drying methods // *Food Research International*. 2025. V. 221. Pt 1. P. 117224. doi: 10.1016/j.foodres.2025.117224
- 62 Басангова Н.Г., Фединишина Е.Ю. Исследование технологических свойств аквафабы из различных видов бобовых // *Биотехнологии и безопасность в техносфере: сб. мат. Всерос. конф., Санкт-Петербург, 2–3 марта 2022 г. СПб.: СПбПУ, 2022. С. 145–147.*
- 63 Романова Х.С., Стрижевская В.Н., Симакова И.В., и др. Изучение структурообразующих свойств аквафабы из красной и белой фасоли // *Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания*. 2025. № 2. С. 50–58. doi: 10.24412/2311-6447-2025-2-50-58
- 64 Плотникова И.В., Магомедов Г.О., Шевякова Т.А., и др. Использование суспензии из бобов чечевицы в производстве кеков для постного и вегетарианского питания // *Хлебопродукты*. 2020. № 6. С. 38–41. doi: 10.32462/0235-2508-2020-29-6-38-41
- 65 Пат. 2737670 С1 Российская Федерация, МПК А23G 3/36, А23G 3/52. Способ получения зефира без яичного белка / Плотникова И.В., Магомедов Г.О., Губковская В.В., и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ВГУИТ». № 2020111370; заявл. 19.03.2020; опубл. 02.12.2020.
- 66 Плотникова И.В., Магомедов Г.О., Полянский К.К., и др. Изучение функциональных свойств концентрата сывороточных белков для дальнейшего его использования в кондитерской отрасли // *Пищевые технологии будущего: инновационные идеи, научный поиск, креативные решения: сб. мат. науч.-практ. молодеж. конф., посвящ. памяти Р.Д. Поляндовой, Москва, 5 июня 2020 г. М.: Буки Веди, 2020. С. 180–184.*
- 67 Восканян О.С., Шипилова П.А. Разработка нового вида мороженого с крымскими специями на основе аквафабы // *Вестник МГУТУ им. К.Г. Разумовского. Серия прикладных научных дисциплин*. 2023. № 1. С. 23–32.
- 68 Тарасов А.В., Заворохина Н.В., Чугунова О.В., Вяткин А.В. Корреляция пенообразующих свойств напитков на растительной основе с физико-химическим составом // *Пищевые системы*. 2025. Т. 8. № 2. С. 306–312. doi: 10.21323/2618-9771-2025-8-2-306-312
- 69 Siddiqui S.A., Asif Z., Murid M., et al. New alternatives from sustainable sources to wheat in bakery foods: Science, technology, and challenges // *Journal of Food Biochemistry*. 2022. V. 46. № 9. P. e14185. doi: 10.1111/jfbc.14185
- 70 Mirzaee H., Razavi S.H., Khodaiyan F., et al. Improved antioxidant, antihypertensive, and antidiabetic activities and tailored emulsion stability and foaming properties of mixture of corn gluten and soy protein hydrolysates via enzymatic processing and fractionation // *Food Science & Nutrition*. 2024. V. 12. № 11. P. 9749–9763. doi: 10.1002/fsn3.3421
- 71 Chen J., Ozturk O.K. Structure-function modulation of protein-rich pumpkin seed flour via microfluidization processing for plant-based applications // *Food Chemistry*. 2026. V. 499. P. 147416. doi: 10.1016/j.foodchem.2026.147416
- 72 Hu D., Yang G., Tian Y., et al. Effect of radio frequency heating on structure and physicochemical properties of protein and starch based on gelatinization degree of rice flour // *Food Research International*. 2025. V. 218. P. 116902. doi: 10.1016/j.foodres.2025.116902

References

- 1 Oduse K., Arogundade L.A., Deng Y. et al. Electrostatic complexes of whey protein and pectin as foaming and emulsifying agents. *International Journal of Food Properties*. 2020. vol. 20. no. sup3. pp. S3027–S3041. doi: 10.1080/10942912.2017.1396478.
- 2 Kulikov D.S., Korolev A.A., Pankratov I.V. Analysis of modern methods for obtaining hydrolysates and bioactive peptides from wheat protein components. *Food Industry*. 2025. no. 4. pp. 88–94. doi: 10.52653/PPI.2025.4.4.016 (in Russian).
- 3 Barros J.H.T., de Souza C.K., Telis-Romero J. et al. Non-thermal emerging technologies as alternatives to chemical additives to improve the quality of wheat flour for breadmaking: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2023. vol. 63. no. 11. pp. 1612–1628. doi: 10.1080/10408398.2021.1966735.
- 4 Kuznetsova L.I., Burykina M.S., Parakhina O.I., Dutchina M.A. Analysis of the quality of rye wholemeal flour produced by flour mills in various regions of Russia in 2020. *Baking in Russia*. 2021. no. 2. pp. 36–43. (in Russian).
- 5 Ma H.F., Wu W., Chen L. et al. Structural and functional properties of soy protein isolates from different cultivars. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025. vol. 300. article 146748. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2025.146748.
- 6 Dwivedi S.K., Issar K., Tiwari V. Nutrient requirements in health and disease. In: *Handbook of Nutraceuticals: Science, Technology and Engineering*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2026. pp. 151–175. doi: 10.1007/978-3-031-65467-5_7.
- 7 Echeverria-Jaramillo E., Jaramillo-García J.D., Fernández-López J. et al. Functional properties of protein fractions from gentle membrane separation of green biomass (legume grass) compared to traditional animal-and plant-based proteins. *Future Foods*. 2025. vol. 11. article 100740. doi: 10.1016/j.fufo.2025.100740.
- 8 Ikram A., Saeed F., Afzaal M. et al. A comprehensive review on biochemical and technological properties of rye (*Secale cereale* L.). *International Journal of Food Properties*. 2023. vol. 26. no. 1. pp. 2212–2228. doi: 10.1080/10942912.2023.2236321.
- 9 Popov V.N., Plotnikova I.V., Magomedov G.O. et al. Comprehensive assessment of the foaming properties of whey protein concentrate for the production of special purpose products. *Food Industry*. 2020. no. 8. pp. 42–47. doi: 10.24411/0235-2486-2020-10084 (in Russian).
- 10 Zhang S., Liu Y., Wu W. Study on the structural characteristics and foaming properties of ovalbumin – Citrus pectin conjugates prepared by the Maillard reaction. *Foods*. 2024. vol. 13. no. 22. article 3542. doi: 10.3390/foods13223542.

- 11 Stamatie G.D., Zaharia R., Tofană M. et al. Nutritional and functional properties of some protein sources. *AgroLife Scientific Journal*. 2021. vol. 10. no. 1. pp. 185–192.
- 12 Premkumar J., Ravi R., Roy S. et al. Corn protein isolate: Characteristic analysis, functional properties, and utilization in beverage formulation. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2022. vol. 46. no. 2. article e16257. doi: 10.1111/jfpp.16257.
- 13 Yakovleva A.A. Prospects for the use of hemp and flax seeds as a source of food protein. *Technical Crops. Scientific Agricultural Journal*. 2024. no. 2(4). pp. 3–9. (in Russian).
- 14 Qazanfarzadeh Z., Kadivar M., Shekarchizadeh H. et al. Functional properties of rye prolamin (Secalin) and their improvement by protein lipophilization through capric acid covalent binding. *Foods*. 2021. vol. 10. no. 3. article 515. doi: 10.3390/foods10030515.
- 15 Janssen F., Monterde V., Wouters A.G.B. Relevance of the air–water interfacial and foaming properties of (modified) wheat proteins for food systems. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2023. vol. 22. no. 3. pp. 1517–1554. doi: 10.1111/1541-4337.13147.
- 16 Zhao M., Lan Y., Zhang H. et al. Comparative study on the foam and air-water interface properties of ethanol-soluble and non-ethanol components in wheat aqueous phase protein. *Food Hydrocolloids*. 2024. vol. 150. article 109700. doi: 10.1016/j.foodhyd.2024.109700.
- 17 Almasova M.G., Tedeeva F.L. Influence of wheat germ on the structural and mechanical properties of dough and the quality of finished bread. In: *Days of Science of NOSU 2023: Materials of the scientific conference based on the results of the work of the Faculty of Chemistry, Biology and Biotechnology of NOSU, Vladikavkaz, April 23, 2024. Vladikavkaz: NOSU, 2024. pp. 18–31. (in Russian).*
- 18 Oyeyinka S.A., Bassey I.A.V. Composition, functionality, and baking quality of flour from four brands of wheat flour. *Journal of Culinary Science & Technology*. 2025. vol. 23. no. 1. pp. 87–107. doi: 10.1080/15428052.2023.2254821.
- 19 Govyadova I.A., Starkova A.V., Kovaleva A.E., Pyanikova E.A. Development of recipe and technology for the production of yeast-free whole grain bread. In: *Food Industry in Modern Conditions: Trends and Innovations: Collection of scientific articles of the International Scientific and Practical Conference, Orel, April 19, 2023. Orel: Orel State Agrarian University, 2023. pp. 53–58. (in Russian).*
- 20 Zhang X., Xu Y., Li J. et al. Interfacial and foaming properties of plant and microbial proteins: Comparison of structure-function behavior of different proteins. *Food Chemistry*. 2025. vol. 463. article 141431. doi: 10.1016/j.foodchem.2024.141431.
- 21 Bochkareva Z.A., Pchelintseva O.N., Belyakova K.N., Sagandykova S.K. Comparative assessment of indicators of rye bread on spontaneous fermentation sourdoughs. *Polzunovsky Bulletin*. 2022. no. 1. pp. 23–30. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.01.003 (in Russian).
- 22 Iuga M., Mironeasa S., Codină G.G. et al. Impact of dairy ingredients on wheat flour dough rheology and bread properties. *Foods*. 2020. vol. 9. no. 6. article 828. doi: 10.3390/foods9060828.
- 23 Shevchuk E.V., Dolgakova M.A. Study of the influence of preheating of amaranth, corn and rice flour on the foaming properties of raw egg white. In: *Technique and Technology of Food Production: Abstracts of the XI International Scientific Conference. Mogilev: MSUF, 2019. p. 130. (in Russian).*
- 24 Burykina M.S., Kuznetsova L.I., Dutchina M.A. Study of the relationship between the amount of protein in rye and wheat flour and its technological properties. *Viticulture and Winemaking*. 2023. vol. 52. pp. 69–71. (in Russian).
- 25 Kuznetsova L.I., Burykina M.S., Savkina O.A. et al. Study of the quality of rye wholemeal flour and its foaming capacity. *Baking in Russia*. 2022. no. 1. pp. 47–50. doi: 10.37443/2073-3569-2022-1-1-47-50 (in Russian).
- 26 Vani B., Zayas J.F. Foaming properties of selected plant and animal proteins. *Journal of Food Science*. 1995. vol. 60. no. 5. pp. 1025–1028. doi: 10.1111/j.1365-2621.1995.tb06293.x.
- 27 Janssen F., Pauly A., Rombouts I. et al. The role of non-starch polysaccharides in determining the air-water interfacial properties of wheat, rye, and oat dough liquor constituents. *Food Hydrocolloids*. 2020. vol. 105. article 105771. doi: 10.1016/j.foodhyd.2020.105771.
- 28 Derkanosova N.M., Stakhurlova A.A., Vasilenko O.A. Prediction of the quality of bakery products based on the study of rheological properties of model mixtures. *Commodity Expert of Food Products*. 2024. no. 7. pp. 404–407. doi: 10.33920/igt-01-2407-04 (in Russian).
- 29 Song M.K., Guo X.N., Zhu K.X. Alkali-induced protein structural, foaming, and air–water interfacial property changes and quantitative proteomic analysis of buckwheat sourdough liquor. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2024. vol. 72. no. 27. pp. 15387–15397. doi: 10.1021/acs.jafc.4c03210.
- 30 Ninomiya K., Abe Y., Matsumura Y. et al. Physicochemical and functional properties of buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) albumin. *Future Foods*. 2022. vol. 6. article 100178. doi: 10.1016/j.fufo.2022.100178.
- 31 Song M.K., Guo X.N., Zhu K.X. Elucidating the gas cell stabilization mechanism of buckwheat-wheat steamed bread induced by transglutaminase: A focus on the foaming and air-water interfacial properties of dough liquor. *Food Hydrocolloids*. 2025. vol. 159. article 110701. doi: 10.1016/j.foodhyd.2024.110701.
- 32 Li T., Wang L., Zhang X. et al. Formation, structural characteristics, foaming and emulsifying properties of rice glutelin fibrils. *Food Chemistry*. 2021. vol. 354. article 129554. doi: 10.1016/j.foodchem.2021.129554.
- 33 Jiang F., Li M., Wang Y. et al. Self-assembly of rice proteins: A perspective on elevating rice protein techno-functional properties. *Trends in Food Science & Technology*. 2024. vol. 151. article 104624. doi: 10.1016/j.tifs.2024.104624.
- 34 Wang D., Li X., Zhang Y. et al. Modification of rice protein and its components: Enhanced fibrils formation and improved foaming properties. *Food Hydrocolloids*. 2025. vol. 158. article 110575. doi: 10.1016/j.foodhyd.2024.110575.
- 35 Li D., Zhao Y., Wang R. et al. Changes of structure and functional properties of rice protein in the fresh edible rice during the seed development. *Food Science and Human Wellness*. 2023. vol. 12. no. 5. pp. 1850–1860. doi: 10.1016/j.fshw.2023.02.034.
- 36 Stone A.K., Nosworthy M.G., Chiremba C., House J.D., Nickerson M.T. A comparative study of the functionality and protein quality of a variety of legume and cereal flours. *Cereal Chemistry*. 2019. vol. 96. pp. 1159–1169. doi: 10.1002/cche.10237.
- 37 Urubkov S.A., Korolev A.A., Smirnov S.O. Ways to increase the bioavailability of legume raw materials in the technology of instant food concentrates. *Modern Science and Innovation*. 2019. no. 3 (27). pp. 111–118. (in Russian).
- 38 Kumar S., Brooks M.S.-L. Enrichment and recovery of pea (*Pisum sativum* L.) proteins using foam fractionation for simultaneous enhancement of their functional properties. *Separation and Purification Technology*. 2025. vol. 364. pt 3. article 132578. doi: 10.1016/j.seppur.2025.132578.
- 39 Jarpa-Parra M., Bamdad F., Wang Y. et al. Understanding the stability mechanisms of lentil legumin-like protein and polysaccharide foams. *Food Hydrocolloids*. 2019. vol. 61. pp. 903–913. doi: 10.1016/j.foodhyd.2016.06.026.

- 40 Khan M.J., Chaudhary S., Ali A., Manickavasagam A. Enzyme-assisted extraction of navy bean protein from whole and dehulled flour: Effects on extractability, structure, and techno-functional properties. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2026. vol. 337. pt 1. article 149476. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2026.149476.
- 41 Lafarga T., Álvarez C., Villaró S., Bobo G., Aguiló-Aguayo I. Potential of pulse derived proteins for developing novel vegan edible foams and emulsions. *International Journal of Food Science & Technology*. 2020. vol. 55. article 14286. doi: 10.1111/ijfs.14286.
- 42 Yang J., Wang C., Li Y. et al. Physical, interfacial and foaming properties of different mung bean protein fractions. *Food Hydrocolloids*. 2023. vol. 143. article 108885. doi: 10.1016/j.foodhyd.2023.108885.
- 43 Vitol I.S., Pankratov G.N., Meleshkina E.P. Biochemical characteristics of new varieties of flour from a binary mixture of wheat and flax. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. vol. 640. no. 2. article 022050. doi: 10.1088/1755-1315/640/2/022050.
- 44 Yan X., Zhu F. Structural, physicochemical and functional properties of quinoa, buckwheat and amaranth protein isolates: A comparative study. *Food Chemistry*. 2025. vol. 491. article 145301. doi: 10.1016/j.foodchem.2025.145301.
- 45 Nooshkam M., Varidi M., Alkobeisi F. Bioactive food foams stabilized by licorice extract/ whey protein isolate/sodium alginate ternary complexes. *Food Hydrocolloids*. 2022. vol. 126. article 107488. doi: 10.1016/j.foodhyd.2022.107488.
- 46 Garmash N.Yu., Cherevach E.I., Levochkina L.V., Zubova V.V. Prospects for the use of non-traditional vegetable foaming agents in the technology of sweet desserts for functional purposes. In: *Modern Problems of Commodity Science, Economics and Food Industry: Collection of articles based on the results of the I Correspondence International Scientific and Practical Conference, Saratov, November 30, 2016*. Saratov: SSEI of Plekhanov Russian University of Economics, 2019. pp. 72–76. (in Russian).
- 47 Sumina S.R., Merkurjev N.V. Analysis and comparative characteristics of the quality of spelt flour from different manufacturers. In: *Safety and Quality of Agricultural Raw Materials and Food 2023: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Moscow, November 22–23, 2023*. Moscow: Sam Poligrafist, 2023. pp. 507–511. (in Russian).
- 48 Nikonorova Yu.Yu., Volkova A.V., Makushin A.N. Study of the rheological properties of dough and bread from a mixture of premium wheat flour and sorghum flour. *Bulletin of KrasGAU*. 2021. no. 4(169). pp. 155–160. doi: 10.36718/1819-4036-2021-4-155-160 (in Russian).
- 49 Nikonorova Yu.Yu., Volkova A.V. Influence of the use of flour from amaranth, sorghum and millet grains on the processes of fermentation and dough ripening. *Eurasian Union of Scientists*. 2020. no. 7-8 (76). pp. 31–35. (in Russian).
- 50 Nigmatzyanov A.S., Koshchina E.I., Nikulina N.Sh., Zagranichnaya A.D. The use of amaranth flour in the production of bakery products. In: *Agro-Industrial Complex of Russia: Education, Science, Production: Collection of articles of the VII All-Russian (national) Scientific and Practical Conference with international participation, Saratov, December 19–21, 2023*. Penza: Penza State Agrarian University, 2024. pp. 121–126. (in Russian).
- 51 Badamshina E.V., Gareeva I.T., Leonova S.A., Koshchina E.I. Influence of triticale flour and bran on the quality indicators of bread sticks. *Bulletin of KrasGAU*. 2023. no. 11(200). pp. 298–304. doi: 10.36718/1819-4036-2023-11-298-304 (in Russian).
- 52 Belyaev A.G., Kaluzhskikh A.G., Boev S.G., Cherkasina A.A. Study of the possibility of using fireweed and peanut flour products in the technology of rye-wheat bread on rye sourdough. In: *Commodity Science, Technology and Expertise: Innovative Solutions and Development Prospects: Proceedings of the National Scientific and Practical Conference, Moscow, October 28, 2020*. Moscow: ZooVetKniga, 2020. pp. 119–125. (in Russian).
- 53 Rusina I.M., Kalesnik I.M. Investigation of quality indicators of bread sticks based on first grade wheat flour, rye flour and table beet powder. *Modern Science and Innovations*. 2022. no. 2(38). pp. 62–70. doi: 10.37493/2307-910X.2022.2.6.
- 54 Kukarkina Yu.K., Makhyanova D.N., Gabdukaeva L.Z. Different types of flour from non-traditional sources of raw materials to expand the range of flour products. In: *Food Industry in Modern Conditions: Trends and Innovations: Collection of scientific articles of the International Scientific and Practical Conference, Orel, April 19, 2023*. Orel: Orel State Agrarian University, 2023. pp. 252–255. (in Russian).
- 55 Ostermann-Porcel M.V., Rinaldoni A.N., Campderrós M.E. Assessment of Jerusalem artichoke as a source for the production of gluten-free flour and fructan concentrate by ultrafiltration. *Applied Food Research*. 2022. vol. 2. no. 2. article 100201. doi: 10.1016/j.afres.2022.100201.
- 56 Pilyakina V.D., Derkanosova N.M., Stakhurlova A.A., Vasilenko O.A. Study of the effect of lupine on the baking properties of flour model mixtures. In: *International Scientific and Practical Conference Dedicated to the Memory of Vasily Matveevich Gorbатов*. 2024. no. 1. pp. 123–128. (in Russian).
- 57 Ghanghas N., Prabhakar P.K., Sharma S., Mukilan M.T. Microfluidization of fenugreek (*Trigonella foenum graecum*) seed protein concentrate: Effects on functional, rheological, thermal and microstructural properties. *LWT*. 2021. vol. 149. article 111830. doi: 10.1016/j.lwt.2021.111830.
- 58 Devyatkin D.I., Chugunova O.V., Pankratyeva N.A. Production of amaranth meal protein hydrolysate with enhanced technological properties. In: *Modern Achievements of Biotechnology: Vector for Technological Leadership: Proceedings of the X International Scientific and Practical Conference, Stavropol, October 21–25, 2025*. Stavropol: Bureau of News, 2025. pp. 93–96. (in Russian).
- 59 Krasnoshtanova A.A., Shults L.V. Production and evaluation of functional properties of protein isolates and hydrolysates from plant raw materials. *Chemistry of Plant Raw Materials*. 2022. no. 4. pp. 299–309. doi: 10.14258/jcprm.20220410952 (in Russian).
- 60 Siddiqui S.A., Singh S., Bahmid N.A. et al. Unveiling the diversity of Non-conventional Proteins-From sources, extraction, technofunctionality, nutraceutical potential to advancement in food Applications-A systematic review. *Waste and Biomass Valorization*. 2025. vol. 16. no. 1. pp. 29–51. doi: 10.1007/s12649-024-02615-5.
- 61 Yisa Njowe K.B., Duodu K.G., Emmambux M.N. Techno-functional properties of protein-rich flours from different species of edible insects as affected by drying methods. *Food Research International*. 2025. vol. 221. pt 1. article 117224. doi: 10.1016/j.foodres.2025.117224.
- 62 Basangova N.G., Fedinishina E.Yu. Study of the technological properties of aquafaba from various types of legumes. In: *Biotechnology and Safety in the Technosphere: Collection of materials of the All-Russian Conference, Saint Petersburg, March 2–3, 2022*. Saint Petersburg: SPbPU, 2022. pp. 145–147. (in Russian).
- 63 Romanova Kh.S., Strizhevskaya V.N., Simakova I.V. et al. Study of the structure-forming properties of aquafaba from red and white beans. *Technologies of Food and Processing Industry of the Agro-Industrial Complex – Healthy Food Products*. 2025. no. 2. pp. 50–58. doi: 10.24412/2311-6447-2025-2-50-58 (in Russian).
- 64 Plotnikova I.V., Magomedov G.O., Shevyakova T.A. et al. The use of lentil bean suspension in the production of muffins for lenten and vegetarian nutrition. *Khleboprodukty*. 2020. no. 6. pp. 38–41. doi: 10.32462/0235-2508-2020-29-6-38-41 (in Russian).

65 Patent no. 2737670 C1, Russian Federation, IPC A23G 3/36, A23G 3/52. Method for producing marshmallow without egg white. Plotnikova I.V., Magomedov G.O., Gubkovskaya V.V. et al.; applicant and patent holder Voronezh State University of Engineering Technologies. no. 2020111370; filed 19.03.2020; publ. 02.12.2020. (in Russian).

66 Plotnikova I.V., Magomedov G.O., Polyansky K.K. et al. Study of the functional properties of whey protein concentrate for its further use in the confectionery industry. In: Food Technologies of the Future: Innovative Ideas, Scientific Search, Creative Solutions: Collection of materials of the Scientific and Practical Youth Conference dedicated to the memory of R.D. Polandova, Moscow, June 5, 2020. Moscow: Buki Vedi, 2020. pp. 180–184. (in Russian).

67 Voskanyan O.S., Shipilova P.A. Development of a new type of ice cream with Crimean spices based on aquafaba. Bulletin of Razumovsky Moscow State University of Technology and Management. Series of Applied Scientific Disciplines. 2023. no. 1. pp. 23–32. (in Russian).

68 Tarasov A.V., Zavorokhina N.V., Chugunova O.V., Vyatkin A.V. Correlation of foaming properties of plant-based beverages with physicochemical composition. Food Systems. 2025. vol. 8. no. 2. pp. 306–312. doi: 10.21323/2618-9771-2025-8-2-306-312 (in Russian).


69 Siddiqui S.A., Asif Z., Murid M. et al. New alternatives from sustainable sources to wheat in bakery foods: Science, technology, and challenges. Journal of Food Biochemistry. 2022. vol. 46. no. 9. article e14185. doi: 10.1111/jfbc.14185.


70 Mirzaee H., Razavi S.H., Khodaiyan F. et al. Improved antioxidant, antihypertensive, and antidiabetic activities and tailored emulsion stability and foaming properties of mixture of corn gluten and soy protein hydrolysates via enzymatic processing and fractionation. Food Science & Nutrition. 2024. vol. 12. no. 11. pp. 9749–9763. doi: 10.1002/fsn3.3421.


71 Chen J., Ozturk O.K. Structure-function modulation of protein-rich pumpkin seed flour via microfluidization processing for plant-based applications. Food Chemistry. 2026. vol. 499. article 147416. doi: 10.1016/j.foodchem.2026.147416.


72 Hu D., Yang G., Tian Y. et al. Effect of radio frequency heating on structure and physicochemical properties of protein and starch based on gelatinization degree of rice flour. Food Research International. 2025. vol. 218. article 116902. doi: 10.1016/j.foodres.2025.116902.


Сведения об авторах

Екатерина М. Колодина к.т.н., преподаватель, кафедра технологии пищевых продуктов и организации питания, Майкопский государственный технологический университет, ул. Первомайская, 191, г. Майкоп, Республика Адыгея, 385000, Россия, goodwill_katya@mail.ru
 <https://orcid.org/0009-0009-5349-1855>

Кирилл Э. Сырых магистрант 2 года обучения, направление подготовки: 19.04.04 Технология продукции и организации общественного питания, Майкопский государственный технологический университет, ул. Первомайская, 191, г. Майкоп, Республика Адыгея, 385000, Россия, starinabill13@mail.ru
 <https://orcid.org/0009-0002-7490-2747>

Газибег О. Магомедов д.т.н., профессор, кафедра технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, gazibeck.magomedov@ya.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-7201-8387>

Магомед Г. Магомедов д.т.н., профессор, кафедра технологии хлебопекарного, кондитерского, макаронного и зерноперерабатывающего производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, mmg@inbox.ru
 <https://orcid.org/0000-0003-2494-4973>

Зурет Н. Хатко д.т.н., профессор, зав. кафедрой технологии пищевых продуктов и организации питания, Майкопский государственный технологический университет, ул. Первомайская, 191, г. Майкоп, Республика Адыгея, 385000, Россия, znkhatko@mail.ru
 <https://orcid.org/0000-0001-7097-1345>


Вклад авторов


Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат


Конфликт интересов


Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.


Information about authors

Ekaterina M. Kolodina Cand. Sci. (Engin.), lecturer, food technology and catering department, Maikop State Technological University, Pervomaiskaya str., 191, Maikop, Republic of Adygea, 385000, Russia, goodwill_katya@mail.ru
 <https://orcid.org/0009-0009-5349-1855>

Kirill E. Syrykh 2-year master's student in the field of training: 19.04.04 Technology of products and catering, food technology and catering department, Maikop State Technological University, Pervomaiskaya str., 191, Maikop, Republic of Adygea, 385000, Russia, starinabill13@mail.ru
 <https://orcid.org/0009-0002-7490-2747>

Gazibeg O. Magomedov Dr. Sci. (Engin.), professor, Bakery technology, confectionery, pasta and grain processing industries department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, gazibeck.magomedov@ya.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-7201-8387>

Magomed G. Magomedov Dr. Sci. (Engin.), professor, Bakery technology, confectionery, pasta and grain processing industries department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, mmg@inbox.ru
 <https://orcid.org/0000-0003-2494-4973>

Zuret N. Khatko Dr. Sci. (Engin.), professor, head of the department, food technology and catering department, Maikop State Technological University, Pervomaiskaya str., 191, Maikop, Republic of Adygea, 385000, Russia, znkhatko@mail.ru
 <https://orcid.org/0000-0001-7097-1345>

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 01/03/2026

После редакции 06/04/2026

Принята в печать 30/04/2026

Received 01/03/2026

Accepted in revised 06/04/2026

Accepted 30/04/2026