

Научная статья

УДК 641.12:577.15

DOI: 10.17586/2310-1164-2025-18-4-26-35

## Оценка методов модификации пенообразующих свойств экстрактов нута

А.А. Клименко\*, Н.В. Барсукова

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Россия, Санкт-Петербург, DronH1999@mail.ru*

**Аннотация.** Анализировали эффективность методов модификации функциональных свойств экстрактов нута для разработки технологии получения растительного аналога белка куриного яйца с повышенными пенообразующими свойствами. Для получения экстрактов использовали нут Кубанский высшего сорта с массовой долей белка  $22,55 \pm 0,77\%$ , который измельчали до размера частиц  $\leq 1$  мм. Образцами сравнения выбраны отвар нута и аквафаба промышленного производства (Гала-Гала, Фаба-Фаба). Использовали методы физической и биотехнологической модификации: изучали влияние тепловой обработки, ультразвукового воздействия, гидролиза протеазой, ксиланазой, комбинированной обработки на пенообразующие свойства и выход белковых веществ в экстрактах нута. Массовую долю белка в растворах исследовали методом Лоури, пенообразующие свойства экстрактов определяли по объему и устойчивости пены. Высокие показатели пены зафиксированы у экстракта после комбинированного воздействия: обработка ультразвуком при 200 Вт в течение 30 мин с последующим гидролизом протеазой при  $55^\circ\text{C}$ , массовая доля фермента 1%, продолжительность 1 ч, pH 8,0–8,5. Данный образец экстракта содержит  $4,25 \pm 0,07$  мг/мл белковых веществ, имеет кратность и устойчивость пены  $5,87 \pm 0,12$  и  $83 \pm 2\%$  соответственно. Экстракт нута с высокой пенообразующей способностью может использоваться в качестве замены белка куриных яиц в рецептуре специализированных кондитерских изделий.

**Ключевые слова:** пищевая биотехнология; ферментативный гидролиз; нут; пенообразующие свойства; ферменты; модификация технологических свойств; ультразвуковая обработка; растительный белок

Original article

## Methods of modifying the foaming properties of chickpea extracts

Andrey A. Klimenko\*, Natalia V. Barsukova

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University  
Russia, St. Petersburg, DronH1999@mail.ru*

**Abstract.** The aim of this study was to analyze the effectiveness of the methods for modifying the functional properties of chickpea extracts to develop a technology for producing a plant-based analogue of chicken egg white with enhanced foaming properties. Kuban chickpeas of premium grade with a protein content of  $22.55 \pm 0.77\%$ , were ground to a particle size of  $\leq 1$  mm to obtain the extracts. Chickpea broth and industrially produced aquafaba (Gala-Gala, Faba-Faba) were selected as comparison samples. The experiment utilized physical and biotechnological modification methods: the effects of heat treatment, ultrasonication, protease and xylanase hydrolysis, and combined processing on the foaming properties and protein yield of chickpea extracts were studied. The protein content of the solutions was determined using the Lowry method, and the foaming properties of the extracts were determined by foam volume and stability. High foam values were recorded for the extract after a combined treatment: ultrasound treatment at 200 W for 30 min followed by protease hydrolysis at  $55^\circ\text{C}$ , enzyme content of 1%, duration of 1 h, pH 8.0–8.5. This extract sample contains  $4.25 \pm 0.07$  mg/ml of protein substances, and has a foam expansion and stability of  $5.87 \pm 0.12\%$  and  $83 \pm 2\%$ , respectively. This chickpea extract with its high foaming capacity can be used as a substitute for chicken egg whites in the formulation of specialized confectionery products.

**Keywords:** food biotechnology; enzymatic hydrolysis; chickpea; foaming properties; enzymes; modification of technological properties; ultrasonic treatment; vegetable protein

## Введение

Способность к пенообразованию является одним из важнейших функционально-технологических свойств пищевых белков. Наиболее высокой пенообразующей способностью обладают белки куриного яйца и поэтому служат востребованным компонентом в кондитерской отрасли. Однако распространенность пищевой аллергии на такой аллерген как белок куриного яйца [1] приводит к необходимости замены его на другие ингредиенты при производстве гипоаллергенных продуктов. Актуальным направлением стал выбор растительных альтернатив, способных воспроизвести функционально-технологические

свойства яичного белка. Одним из таких аналогов является аквафаба – отвар бобовых, характеризующийся пенообразующими, загущающими свойствами за счет содержания белков, сапонинов, крахмальных и пектиновых веществ [2]. Сегодня существуют такие аналоги промышленного производства, однако результаты личных проработок показывают, что их пенообразующие характеристики уступают традиционному продукту. Более того, не во всех изделиях получается полноценно воспроизвести функции куриного белка [3].

Ключевая задача – разработка функционального ингредиента с высокими пенообразующими свойствами, способного заменить куриное яйцо. Для ее решения необходимо изучить процесс пенообразования, а также факторы и методы, которые положительно влияют на его природу. Пена представляет собой дисперсную систему, где дисперсной фазой является газ, а дисперсионной средой – жидкость. Образование пены происходит, когда белок адсорбируется на поверхности жидкость–газ. В результате данного процесса на границе раздела фаз начинает образовываться белковая пленка, а поверхностное натяжение воды уменьшается. Разворот вторичной, третичной структуры белка позволяет обнажить гидрофобные группы, способствующие образованию полимеров с большей молекулярной массой, что приводит к изменению растворимости, а также увеличению эмульгирующих и пенообразующих свойств протеинов [4, 5].

На процесс пенообразования оказывают влияние следующие факторы: концентрация белка (при увеличении концентрации наблюдается улучшение пенообразующих свойств [6–9]); значение pH (при pH = 5,0–6,0 увеличивается кратность и устойчивость пены [10, 11]). Кроме того, существуют методы модификации пенообразующих свойств, наиболее безопасные из которых для пищевой промышленности физическая (тепловое воздействие, ультразвуковая обработка) и биотехнологическая модификация, а также их сочетание (комбинирование).

Тепловая обработка приводит к определенным физико-химическим изменениям в бобовых системах (денатурация белков, повышение растворимости низкомолекулярных сахаров и сапонинов), которые в совокупности оказывают положительное влияние на процесс пенообразования. Ученые отмечают улучшение пенообразующих свойств после 30 мин обработки образцов при температуре выше 70°C [12–14].

В результате эффекта кавитации при ультразвуковой обработке происходит частичная денатурация белка, изменение структуры макромолекул, уменьшение размера частиц. Ультразвуковая обработка при 200 Вт в течение 30 мин горохового изолята увеличила кратность пены на 50%, а устойчивость на 15% [15, 16].

Сегодня одним из перспективных методов модификации функциональных свойств растительных белков является ферментативный гидролиз. Многочисленные исследования [17–21] в этой области показали положительный результат воздействия данного биотехнологического метода на пенообразующие показатели протеинов. Используя нейтральную протеазу [17], ученые изучали влияние продолжительности гидролиза на пенообразующие свойства белка куриного яйца. В ходе экспериментов установили, что кратность пены возрастает на 38% после 15 мин реакции. При этом наблюдалось увеличение количества полипептидов с небольшой молекулярной массой (<10 кДа), что способствует адсорбции на границе раздела фаз.

В других работах [18] в качестве ферментного препарата применяли трипсин. Эксперименты показали, что после частичного гидролиза (до 30 мин) у образца были более высокие значения кратности и устойчивости пены, чем у белка без модификации. Зарубежные исследователи модифицировали овальбумин (ОВА) с помощью щелочной протеазы [19], и в этом случае пенообразующая способность гидролизованного образца лучше, чем у объекта без ферментативной обработки.

Отечественные ученые [20] проводили ферментативный гидролиз для льняных, кукурузных, гороховых и овсяных изолятов и установили, что гидролиз в течение 15 мин панкреатином позволяет повысить ВУС и ЖУС горохового изолята. А при продолжительности 60–90 мин у опытных образцов наблюдалось повышение пенообразующих и эмульгирующих способностей.

Эксперименты по гидролизу текстурированной соевой муки (ТСМ), концентрата белка сои (КБС) с помощью ферментных препаратов (панкреатина, протосубтилина) [21] продемонстрировали, что наибольшая пенообразующая способность проявляется при действии протосубтилина. Он способен

частично разрушать белок, сохраняя полипептидный каркас, необходимый для хорошего пенообразования. Пик пенообразующей способности для ТСМ был зафиксирован при концентрации ферментного препарата 0,5% (от массы субстрата) и продолжительности гидролиза 30 мин. Для КБС при концентрации ферментного препарата 2% и продолжительности гидролиза – 120 мин.

В диссертации Е. В. Милорадовой [22] подробно описано влияние ферментативной обработки на пенообразующие свойства соевых белков и показано, что в результате гидролиза смесью ферментных препаратов протеолитического действия (Бирзим П7, Флавозим) у объектов испытаний были самые высокие показатели кратности и устойчивости пены.

Анализируя значительный объем исследований в области модификации белков, следует отметить, что недостаточно изучены функциональные свойства белков нута, несмотря на его высокий белковый потенциал и распространенность как сырья. Пенообразующая способность нута зависит от доступности белковых соединений, а также других поверхностно-активных веществ (сапонинов). Данные вещества локализованы внутри структурной матрицы клеточных оболочек, что создает существенные ограничения для реализации их функциональных характеристик в технологических процессах. Физические методы обработки позволяют решить данную проблему путем разрушения клеточной стенки, однако их применение ограничено (риск чрезмерной денатурации белка). Воздействие на полисахариды нута ксиланазой (фермента, разрушающего  $\beta$ -1,4-связи в арабиноксиланах, которые являются основой гемицеллюлозного каркаса клеточной стенки) может положительно отразиться на доступности поверхностно-активных веществ и улучшить пенообразующие характеристики. Данный биотехнологический метод обладает высокой избирательностью и более мягкими условиями в сравнении с тепловой обработкой.

Важно отметить, что на сегодняшний день ряд научных вопросов остается нерешенным: отсутствует сравнительная оценка эффективности различных методов модификации применительно к белкам бобовых культур; не разработаны технологические подходы получения растительных аналогов белка куриного яйца с воспроизводимыми пенообразующими свойствами. Учитывая возрастающий интерес пищевой промышленности к разработке гипоаллергенных ингредиентов и растительных аналогов животного сырья, проведение исследований в данном направлении является актуальной научной задачей.

Цель настоящего исследования – провести анализ эффективности методов модификации функциональных свойств экстрактов нута для разработки технологии получения растительного аналога белка куриного яйца с повышенными показателями кратности и устойчивости пены.

## Объекты и методы исследования

Объектом исследования выбран нут Кубанский высшего сорта, выращенный в Краснодарском крае, урожай 2023 г. Массовую долю белка в нуте определяли методом Кьельдаля (ГОСТ 13496.4-2019). Для получения экстрактов нут измельчали с помощью электрической мельницы АКТАЈР MJ150B (АКТАЈР, Китай) до получения муки с размером частиц  $\leq 1$  мм, затем смешивали с водой при определенном гидромодуле. Полученные суспензии обрабатывали физическими методами: ультразвуком с использованием дезинтегратора-гомогенизатора ScientzIID (Scientz Bio, Китай) при 200 Вт в течение 10–30 мин и тепловым нагревом (таблица 1).

Таблица 1. Характеристика физических методов обработки нута

Table 1. Characteristics of physical methods of chickpea processing

Образец	Метод модификации	Гидромодуль	Продолжительность обработки, мин	Температура, °С	Мощность, Вт
1	тепловая обработка	1:10	10	90	–
2	тепловая обработка	1:10	20	90	–
3	тепловая обработка	1:10	30	90	–
4	ультразвуковое воздействие	1:10	10	–	200
5	ультразвуковое воздействие	1:10	20	–	200
6	ультразвуковое воздействие	1:10	30	–	200

Биотехнологическую модификацию осуществляли с помощью протеазы и ксиланазы (таблица 2) в термостате при постоянной температуре в соответствии с рекомендациями производителя (таблица 3).

Таблица 2. Характеристика ферментных препаратов

Table 2. Characteristics of enzyme preparations

Торговое название препарата	Активность, ед/г	Оптимальный pH	Оптимальная $t$ , °C	Ферменты
протозим	50 000	6,0–10,0	55–65	бактериальная щелочная протеаза
ксиналаза	10 000	4,0–7,5	50–60	ксиналаза

Таблица 3. Характеристика биотехнологических методов обработки нута

Table 3. Characteristics of biotechnological methods of chickpea processing

Образец	Наименование фермента	Массовая доля фермента, %	Гидро модуль	Температура, °C	Продолжительность ферментации, мин	pH
7	протозим	0,5	1:5	55	60	8,0–8,5
8	протозим	0,5	1:5	55	120	8,0–8,5
9	протозим	0,5	1:5	55	180	8,0–8,5
10	протозим	1,0	1:5	55	60	8,0–8,5
11	протозим	1,0	1:5	55	120	8,0–8,5
12	протозим	1,0	1:5	55	180	8,0–8,5
13	протозим	1,5	1:5	55	60	8,0–8,5
14	протозим	1,5	1:5	55	120	8,0–8,5
15	протозим	1,5	1:5	55	180	8,0–8,5
16	ксиналаза	1,0	1:5	55	60	5,5–6,0
17	ксиналаза	1,0	1:5	55	120	5,5–6,0
18	ксиналаза	1,0	1:5	55	180	5,5–6,0
19	ксиналаза	2,0	1:5	55	60	5,5–6,0
20	ксиналаза	2,0	1:5	55	120	5,5–6,0
21	ксиналаза	2,0	1:5	55	180	5,5–6,0
22	ксиналаза	3,0	1:5	55	60	5,5–6,0
23	ксиналаза	3,0	1:5	55	120	5,5–6,0
24	ксиналаза	3,0	1:5	55	180	5,5–6,0

Комбинированную модификацию осуществляли в два этапа:

1. ультразвуковая обработка с использованием дезинтегратора-гомогенизатора ScientzIID;
2. обработка ферментом протозим (таблица 4).

Таблица 4. Характеристика комбинированного метода обработки нута

Table 4. Characteristics of the combined method of chickpea processing

Наименование образца	Гидро модуль	Ультразвуковая обработка		Обработка ферментом протозим		
		мощность, Вт	время обработки, мин	массовая доля фермента, %	время обработки, мин	pH
25	1:10	200	30	0,5	60	8,0–8,5
26	1:10	200	30	0,5	120	8,0–8,5
27	1:10	200	30	0,5	180	8,0–8,5
28	1:10	200	30	1,0	60	8,0–8,5
29	1:10	200	30	1,0	120	8,0–8,5
30	1:10	200	30	1,0	180	8,0–8,5
31	1:10	200	30	1,5	60	8,0–8,5
32	1:10	200	30	1,5	120	8,0–8,5
33	1:10	200	30	1,5	180	8,0–8,5

Ферментативную реакцию останавливали с помощью термической инактивации препарата в течение 2 мин при температуре 90°C согласно литературным данным [23, 24]. После этого образцы



охлаждали до температуры 30–40°C для выравнивания условий перед центрифугированием и предотвращения термодестабилизации белковых структур в соответствии с паспортными характеристиками центрифуги ELMi CM-6M (ELMI, Латвия). Температуру суспензии измеряли в центральной части жидкой фазы после перемешивания с помощью лабораторного термометра (точность  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ ), получая среднееобъемное значение. Осадок после физических и биотехнологических воздействий отделяли центрифугированием с помощью центрифуги в течение 10 мин при 1000 об/мин.

В качестве контрольных образцов использовали отвар нута (аквафабу) собственного приготовления, а также промышленные образцы сублимированных отваров нута: Гала-Гала (СТО 47488077-004-2020); Фаба-Фаба (ТУ 01.11.73.110-003-754360462020). Объекты исследования подготавливали в соответствии с рекомендациями производителей (таблица 5).

Таблица 5. Технология приготовления растворов аквафабы [25]

Table 5. Technology of preparation of aquafaba solutions

Наименование образца	Способ получения растворов
Гала-Гала (СТО 47488077-004-2020)	5 г порошка + 50 мл воды (гидромодуль 1:10); $t = 40\text{--}50^\circ\text{C}$
Фаба-Фаба (ТУ 01.11.73.110-003-754360462020)	4 г порошка + 40 мл воды (гидромодуль 1:10); $t = 40\text{--}50^\circ\text{C}$
аквафаба собственного приготовления	50 г нута замочили на 9 ч в воде ( $t = 10\text{--}15^\circ\text{C}$ ), затем отварили в течение 2 ч ( $t = 90^\circ\text{C}$ , гидромодуль 1:4); полученный отвар (70 мл) охладили до $t = 40\text{--}50^\circ\text{C}$ и профильтровали через сито с размером отверстия 1 мм

В супернатантах и образцах аквафабы устанавливали количество белка в растворе методом Лоури (ОФС.1.2.3.0012.15). Оценку пенообразующих показателей (кратность и устойчивость пены) осуществляли по методике, описанной в предыдущих исследованиях авторов [8].

## Результаты и их обсуждение

Массовая доля белка в нуте составила  $22,55 \pm 0,77\%$ . Полученные данные использовали для выбора оптимальных дозировок ферментных препаратов.

Результаты исследования пенообразующих свойств и концентрации белка в экстрактах нута представлены в таблице 6 и показывают, что наиболее высокие пенообразующие свойства зафиксированы у промышленных образцов аквафабы и отвара нута, а также у объектов после ультразвуковой обработки в течение 30 мин при 200 Вт (образец 6), после ферментативной обработки ксиланазой в течение 3 ч, массовая доля фермента 3,0% (образец 24), у образца 28 после комбинированного способа обработки (ультразвук 30 мин при 200 Вт + обработка протеазой в течение 1 ч, массовая доля фермента 1,0%). Средние значения были зафиксированы у образцов, где осуществлялась тепловая обработка (образцы 1–3). Низкие характеристики пены у объектов после гидролиза протеазой (образцы 7–15). Вероятно, наличие ингибиторов протеаз в нуте негативно отразилось на течении ферментативной реакции. Более того, белковые соединения в нуте локализованы внутри структурной матрицы клеточных оболочек. Такое пространственное расположение могло препятствовать взаимодействию с протеазой. Предварительная ультразвуковая обработка позволила повысить доступность белковых соединений и снизить активность ингибиторов. Это соотносится с полученными результатами. Кратность, устойчивость, выход белковых веществ выше в 2–3 раза после комбинированного способа обработки (образцы 25–33), чем после обработки только протеазой (образцы 7–15). Свою эффективность в качестве метода модификации пенообразующих свойств продемонстрировала ксиланаза. У объектов, обработанных данным ферментом, показатели выше на 20–40%, чем после теплового воздействия и гидролиза протеазой.

На рисунках 1 и 2 представлено сравнение кратности и устойчивости пены между образцами с наиболее высокими показателями, а также содержание в них белковых веществ. Анализ графиков показывает, что у первых 4 объектов наблюдается зависимость кратности и устойчивости пены от количества белковых веществ в растворе (чем больше данный показатель, тем выше пенообразующие свойства). После модификации ультразвуком у образца 6 кратность, устойчивость и содержание белковых веществ выше, чем у отвара нута. Среди промышленных аквафаб наиболее высокие пенообразующие

свойства и выход белковых веществ имеет образец Гала-Гала. Образец после комбинированного способа обработки имеет самый значительный выход белковых веществ – 4,25 мг/мл, однако кратность пены ниже на 23%, а ее устойчивость на 2% по сравнению с аквафабой Гала-Гала. Вероятно, это связано с тем, что в процессе ферментативного гидролиза началось образование коротких пептидов, которые менее эффективно проявляют пенообразующие свойства. Это происходит, когда степень гидролиза  $DH > 15\%$  [26]. Ультразвуковая обработка и ферментативный гидролиз изменили баланс гидрофильных и гидрофобных участков. Для увеличения кратности пены необходимо, чтобы у белков было определенное количество гидрофобных участков, и они могли адсорбироваться на границе фаз воздух–вода.

Таблица 6. Характеристика пенообразующих свойств объектов исследования

Table 6. Characteristics of foaming properties of research objects

Наименование/образец	Характеристика пены		Концентрация белковых веществ, мг/мл
	кратность	устойчивость, %	
аквафаба Гала-Гала	7,55 ± 0,17	85 ± 2	1,88 ± 0,02
аквафаба Фаба-Фаба	6,83 ± 0,15	82 ± 1	1,74 ± 0,03
отвар нута	4,65 ± 0,14	78 ± 1	1,60 ± 0,04
Экстракты нута, полученные с использованием физических и биохимических методов обработки			
Тепловая обработка			
1	2,51 ± 0,10	45 ± 3	1,32 ± 0,04
2	2,83 ± 0,16	49 ± 2	1,44 ± 0,04
3	3,12 ± 0,19	53 ± 2	1,56 ± 0,05
Ультразвуковая обработка			
4	3,14 ± 0,16	53 ± 3	1,47 ± 0,03
5	3,76 ± 0,16	56 ± 3	1,55 ± 0,04
6	4,87 ± 0,12	79 ± 3	1,65 ± 0,05
Ферментативная обработка протеазой			
7	2,14 ± 0,12	32 ± 2	1,59 ± 0,04
8	2,32 ± 0,13	35 ± 3	1,91 ± 0,04
9	1,47 ± 0,10	27 ± 2	2,49 ± 0,05
10	2,21 ± 0,13	34 ± 2	1,71 ± 0,03
11	2,44 ± 0,12	32 ± 2	2,08 ± 0,05
12	1,53 ± 0,11	28 ± 3	2,57 ± 0,03
13	1,34 ± 0,12	27 ± 2	2,02 ± 0,05
14	2,11 ± 0,14	25 ± 2	2,30 ± 0,04
15	1,49 ± 0,13	23 ± 4	2,68 ± 0,04
Ферментативная обработка ксиланазой			
16	4,24 ± 0,12	71 ± 2	2,01 ± 0,06
17	4,26 ± 0,13	72 ± 1	2,10 ± 0,03
18	4,32 ± 0,12	73 ± 3	2,14 ± 0,04
19	4,32 ± 0,12	73 ± 3	2,15 ± 0,04
20	4,33 ± 0,12	74 ± 2	2,22 ± 0,05
21	4,37 ± 0,13	74 ± 3	2,23 ± 0,04
22	4,56 ± 0,13	73 ± 2	2,25 ± 0,05
23	4,62 ± 0,13	75 ± 3	2,34 ± 0,04
24	4,70 ± 0,13	76 ± 2	2,37 ± 0,05
Комбинированный способ обработки (ультразвуковое воздействие + протеаза)			
25	5,34 ± 0,12	80 ± 2	3,98 ± 0,07
26	5,17 ± 0,15	79 ± 3	4,05 ± 0,07
27	3,98 ± 0,11	63 ± 3	4,10 ± 0,07
28	5,87 ± 0,12	83 ± 2	4,25 ± 0,07
29	5,67 ± 0,11	81 ± 2	4,32 ± 0,07
30	4,20 ± 0,10	78 ± 3	4,35 ± 0,07
31	5,78 ± 0,10	82 ± 1	4,41 ± 0,07
32	5,24 ± 0,15	79 ± 2	4,46 ± 0,07
33	4,34 ± 0,14	74 ± 3	4,48 ± 0,07

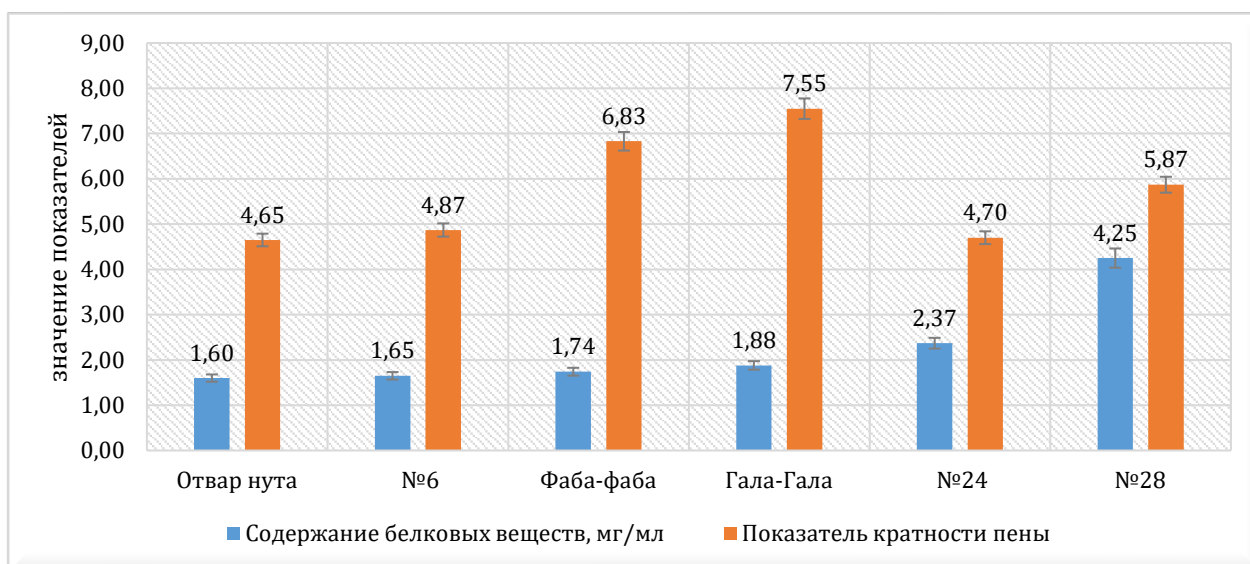


Рисунок 1 – Анализ кратности пены после модификации  
Figure 1. Analysis of foam multiplicity after modification

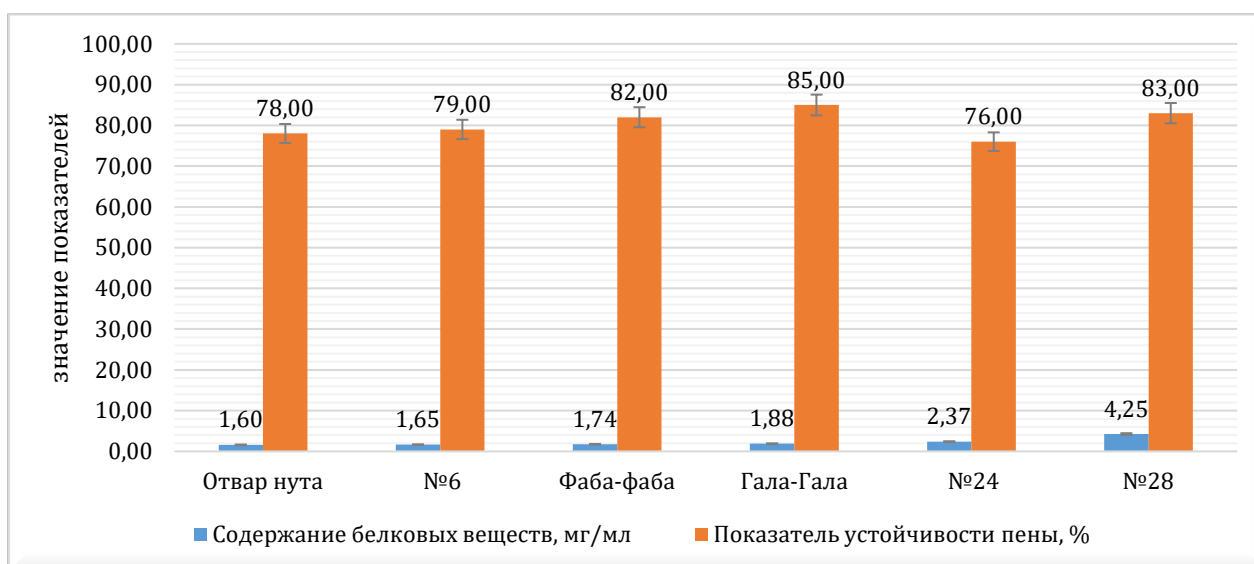


Рисунок 2 – Анализ устойчивости пены после модификации  
Figure 2. Analysis of foam stability after modification

Коммерческие образцы аквафаб имеют низкие значения белковых веществ, но достаточно высокие пенообразующие характеристики. Исходя из этого, можно предположить, что в их составе используются вещества небелковой природы (положительно влияющие на функциональные свойства): пищевые гидроколлоиды (ксантановая и гуаровая камеди, каррагинан, геллановая камедь), растительные поверхностно-активные вещества (сапонины, лецитин), олигосахариды и органические кислоты, стабилизирующие пену.

## Заключение

Из результатов исследования можно сделать вывод, что из представленных методов модификаций наиболее эффективным является комбинированный (ультразвуковая обработка в течение 30 мин при 200 Вт и обработка протеазой в течение 1 ч, массовая доля фермента 1,0%). Для снижения вероятности образования коротких пептидов, которые менее эффективно проявляют пенообразующие свойства, в дальнейших исследованиях планируется сократить продолжительность ферментативного гидролиза и проанализировать, как это влияет на функциональные показатели экстрактов нута. Итоги экспериментов свидетельствуют о положительном влиянии ксиланазы на выход белковых веществ, кратности и устойчивости пены в экстрактах нута, в сравнении с тепловой обработкой и ферментативным

гидролизом протеазой. Использование данного ферментного препарата в качестве предварительной обработки бобовой культуры можно рассматривать как способ увеличения количества доступных поверхностно-активных веществ. Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка специализированных мультиэнзимных композиций, включающих ксиланазу в сочетании с протеазой. В рамках таких композиций ксиланаза выполняет функцию обеспечения доступности белковых веществ, тогда как протеаза оказывает модифицирующее воздействие. Образцы экстрактов 6, 24, 28 рекомендуются в качестве замены белка куриных яиц в рецептурах специализированных кондитерских изделий.

## Литература

1. Leung A.S.Y., Wong G.W.K., Tang M.L.K. Food allergy in the developing world. *J Allergy Clin Immunol.* 2018, V. 141, no. 1, pp. 76–78.e1. DOI: 10.1016/j.jaci.2017.11.008
2. Shim Y.Y., He Y., Kim J.H., Cho J.Y., Meda V., Hong W.S., Shin W.S., Kang S.J., Reaney M.J.T. Aquafaba from Korean soybean I: A functional vegan food additive. *Foods.* 2021. V. 10, Is. 10, article 2433. DOI: 10.3390/foods10102433
3. Клименко А.А., Барсукова Н.В., Федюнина Е.Ю., Шамилов Ш.А. Использование аквафабы в производстве специализированных десертов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2023. Т. 12. № 2. С. 79–84.
4. Sirison J., Ishii T., Matsumiya K., Samoto M., Kohno M., Matsumura Y. Comparison of surface and foaming properties of soy lipophilic protein with those of glycinin and  $\beta$ -conglycinin. *Food Hydrocolloids.* 2021, V. 112, article 106345. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2020.106345
5. Grossmann L., Beicht M., Reichert C., Weiss J. Foaming properties of heat-aggregated microparticles from whey proteins. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.* 2019, V. 579, article 123572 DOI: 10.1016/j.colsurfa.2019.06.037
6. Dachmann E., Nobis V., Kulozik U., Dombrowski J. Surface and foaming properties of potato proteins: Impact of protein concentration, pH value and ionic strength. *Food Hydrocolloids,* 2020, V. 107, article 105981. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2020.105981
7. Koop J., Merz J., Wilmshöfer R., Winter R., Schembecker G. Influence of thermally induced structure changes in diluted  $\beta$ -lactoglobulin solutions on their surface activity and behavior in foam fractionation. *Journal of Biotechnology.* 2020, V. 319, pp. 61–68. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2020.05.011
8. Cervin N.T., Johansson E., Benjamins J.-W., Wågberg L. Mechanisms behind the stabilizing action of cellulose nanofibrils in wet-stable cellulose foams. *Biomacromolecules.* 2015, V. 16, pp. 822–831. DOI: 10.1021/bm5017173
9. Nastaj M., Sołowiej B.G. The effect of various pH values on foaming properties of whey protein preparations. *International Journal of Dairy Technology.* 2020, V. 73, pp. 683–694. DOI: 10.1111/1471-0307.12705.
10. Wouters A.G., Joye I.J., Delcour J.A. Understanding the air-water interfacial behavior of suspensions of wheat gliadin nanoparticles. *Food Hydrocolloids.* 2020, V. 102, article 105638. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2019.105638
11. Zhang J.-C., Zhang L., Wang X.-C., Zhang L., Zhao S., Yu J.-Y. A surface rheological study of polyoxymethylene alkyl ether carboxylic salts and the stability of corresponding foam. *Journal of Dispersion Science and Technology.* 2011, V. 32, pp. 372–379. DOI: 10.1080/01932691003662381
12. Rickert D., Johnson L., Murphy P. Functional properties of improved glycinin and  $\beta$ -nglycinin fractions. *Journal of Food Science.* 2006, V. 69, pp. 303–311. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2004.tb06332.x
13. He Z., Li W., Guo F., Li W., Zeng M., Chen J. Foaming characteristics of commercial soy protein isolate as influenced by heat-induced aggregation. *International Journal of Food Properties.* 2015, V. 18, pp. 1817–1828. DOI: 10.1080/10942912.2014.946046
14. Critello D.C., Pullano S.A., Gallo G., Matula T.J., Fiorillo A.S. Low frequency ultrasound as a potentially viable foaming option for pathological veins. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.* 2020, V. 599, article 124919. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2020.124919
15. Jambrak A.R., Lelas V., Mason T.J., Krešić G., Badanjak M. Physical properties of ultrasound treated soy proteins. *Journal of Food Engineering.* 2009, V. 93, pp. 386–393. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2009.02.001.
16. Higuera-Barraza O., Del Toro-Sanchez C., Ruiz-Cruz S., Márquez-Ríos E. Effects of high-energy ultrasound on the functional properties of proteins. *Ultrasonics Sonochemistry.* 2016. V. 31, pp. 558–562. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2022.106193
17. Arredondo-Parada I., Torres-Arreola W., Suárez-Jiménez G.M. Effect of ultrasound on physicochemical and foaming properties of a protein concentrate from giant squid (*Dosidicus gigas*) mantle. *LWT,* 2020. V. 121, article 108954. DOI: 10.1016/j.lwt.2019.108954
18. Tamm F., Herbst S., Brodtkorb A., Drusch S. Functional properties of pea protein hydrolysates in emulsions and spray-dried microcapsules. *Food Hydrocolloids.* 2016, V. 58, pp. 204–214. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2016.02.032



19. Wan Y., Liu J., Guo S. Effects of succinylation on the structure and thermal aggregation of soy protein isolate. *Food Chemistry*. 2018, V. 245, pp. 542–550. DOI: 10.1016/j.foodchem.2017.10.137
20. 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.
21. Хабибулина Н.В., Гордиенко М.Г., Шишова Е.С., Дмитриева Ю.А. Изучение влияния ограниченного протеолиза на пенообразующую способность соевых продуктов // Ceteris Paribus. 2015. № 2. С. 5–7.
22. Милорадова Е.В. Продукты ферментативной модификации соевой муки: научные и практические аспекты получения и применения в пищевых технологиях: дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 2010. 452 с.
23. Gomes J.E.G., Rosa I.Z., Nascimento T.C.E.S., Souza-Motta C.M., Gomes E., Boscolo M., Moreira K.A., Pintado M.M.E., da Silva R. Biochemical and thermodynamic characteristics of a new serine protease from *Mucor subtilissimus* URM 4133. *Biotechnology Reports (Amst.)*. 2020, V. 28, article e00552. DOI: 10.1016/j.btre. 2020.e00552.
24. Singh S., Pillay B., Prior B. A. Thermal stability of  $\beta$ -xylanases produced by different *Thermomyces lanuginosus* strains. *Enzyme and Microbial Technology*. 2000, V. 26, pp. 502–508. DOI: 10.1016/S0141-0229(00)00193-3.
25. Клименко, А.А., Барсукова Н.В. Исследование пенообразующих свойств аквафабы // Новейшие достижения в области медицины, здравоохранения и здоровьесберегающих технологий: сб. тр. Кемерово: Кемеровский государственный университет, 2022. С. 165–168. DOI: 10.21603/-I-IC-52.
26. Yust M. del M., Milan-Linares M. del C., Alcaide-Hidalgo J. M., Milan F., Pedroche J. Hydrolysis of chickpea proteins with Flavourzyme immobilized on glyoxyl-agarose gels improves functional properties. *Food Science and Technology International*. 2013, V. 19, pp. 217–223. DOI: 10.1177/1082013212442197.

## References

1. Leung A.S.Y., Wong G.W.K., Tang M.L.K. Food allergy in the developing world. *J Allergy Clin Immunol*. 2018, V. 141, no. 1, pp. 76–78.e1. DOI: 10.1016/j.jaci.2017.11.008
2. Shim Y.Y., He Y., Kim J.H., Cho J.Y., Meda V., Hong W.S., Shin W.S., Kang S.J., Reaney M.J.T. Aquafaba from Korean soybean I: A functional vegan food additive. *Foods*. 2021. V. 10, Is. 10, article 2433. DOI: 10.3390/foods10102433
3. Klimenko A.A., Barsukova N.V., Fedinishina E.Yu., Shamilov Sh.A. Use of aquafaba in the production of specialized desserts. *XXI Century: Resumes of the Past and Challenges of the Present Plus*. 2023, V. 12, no. 2, pp. 79–84. (In Russian)
4. Sirison J., Ishii T., Matsumiya K., Samoto M., Kohno M., Matsumura Y. Comparison of surface and foaming properties of soy lipophilic protein with those of glycinin and  $\beta$ -conglycinin. *Food Hydrocolloids*. 2021, V. 112, article 106345. DOI: 106345. 10.1016/j.foodhyd.2020.106345
5. Grossmann L., Beicht M., Reichert C., Weiss J. Foaming properties of heat-aggregated microparticles from whey proteins. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2019, V. 579, article 123572 DOI: 10.1016/j.colsurfa.2019.06.037
6. Dachmann E., Nobis V., Kulozik U., Dombrowski J. Surface and foaming properties of potato proteins: Impact of protein concentration, pH value and ionic strength. *Food Hydrocolloids*, 2020, V. 107, article 105981. DOI: 105981.10.1016/j.foodhyd.2020.105981
7. Koop J., Merz J., Wilmshöfer R., Winter R., Schembecker G. Influence of thermally induced structure changes in diluted  $\beta$ -lactoglobulin solutions on their surface activity and behavior in foam fractionation. *Journal of Biotechnology*. 2020, V. 319, pp. 61 – 68. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2020.05.011
8. Cervin N.T., Johansson E., Benjamins J.-W., Wågberg L. Mechanisms behind the stabilizing action of cellulose nanofibrils in wet-stable cellulose foams. *Biomacromolecules*. 2015, V. 16, pp. 822–831. DOI: 10.1021/bm5017173
9. Nastaj M., Sołowiej B.G. The effect of various pH values on foaming properties of whey protein preparations. *International Journal of Dairy Technology*. 2020, V. 73, pp. 683–694. DOI: 10.1111/1471-0307.12705
10. Wouters A.G., Joye I.J., Delcour J.A. Understanding the air-water interfacial behavior of suspensions of wheat gliadin nanoparticles. *Food Hydrocolloids*. 2020, V. 102, article 105638. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2019.105638
11. Zhang J.-C., Zhang L., Wang X.-C., Zhang L., Zhao S., Yu J.-Y. A surface rheological study of polyoxymethylene alkyl ether carboxylic salts and the stability of corresponding foam. *Journal of Dispersion Science and Technology*. 2011, V. 32, pp. 372–379. DOI: 10.1080/01932691003662381
12. Rickert D., Johnson L., Murphy P. Functional properties of improved glycinin and  $\beta$ -nglycinin fractions. *Journal of Food Science*. 2006, V. 69, pp. 303–311. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2004.tb06332.x
13. He Z., Li W., Guo F., Li W., Zeng M., Chen J. Foaming characteristics of commercial soy protein isolate as influenced by heat-induced aggregation. *International Journal of Food Properties*. 2015, V. 18, pp. 1817–1828. DOI: 10.1080/10942912.2014.946046
14. Critello D.C., Pullano S.A., Gallo G., Matula T.J., Fiorillo A.S. Low frequency ultrasound as a potentially viable foaming option for pathological veins. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2020, V. 599, article 124919. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2020.124919

15. Jambrak A.R., Lelas V., Mason T.J., Krešić G., Badanjak M. Physical properties of ultrasound treated soy proteins. *Journal of Food Engineering*. 2009, V. 93, pp. 386–393. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2009.02.001.
16. Higuera-Barraza O., Del Toro-Sanchez C., Ruiz-Cruz S., Márquez-Ríos E. Effects of high-energy ultrasound on the functional properties of proteins. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2016. V. 31, pp. 558–562. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2022.106193
17. Arredondo-Parada I., Torres-Areola W., Suárez-Jiménez G.M. Effect of ultrasound on physicochemical and foaming properties of a protein concentrate from giant squid (*Dosidicus gigas*) mantle. *LWT*, 2020. V. 121, article 108954. DOI: 10.1016/j.lwt.2019.108954
18. Tamm F., Herbst S., Brodkorb A., Drusch S. Functional properties of pea protein hydrolysates in emulsions and spray-dried microcapsules. *Food Hydrocolloids*. 2016, V. 58, pp. 204–214. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2016.02.032
19. Wan Y., Liu J., Guo S. Effects of succinylation on the structure and thermal aggregation of soy protein isolate. *Food Chemistry*. 2018, V. 245, pp. 542–550. DOI: 10.1016/j.foodchem.2017.10.137
20. Krasnoshtanova A.A., Shults L.V. Preparation and evaluation of the 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)
21. Khabibulina N.V., Gordienko M.G., Shishova E.K., Dmitrieva Yu.A. Study of the effect of limited proteolysis on the foaming ability of soy products. *Ceteris Paribus*. 2015, no. 2, pp. 5–7. (In Russian)
22. Miloradova E.V. Products of enzymatic modification of soy flour: scientific and practical aspects of production and application in food technologies. *Doctor's Thesis*. Moscow, 2010. (In Russian)
23. Gomes J.E.G., Rosa I.Z., Nascimento T.C.E.S., Souza-Motta C.M., Gomes E., Boscolo M., Moreira K.A., Pintado M.M.E., da Silva R. Biochemical and thermodynamic characteristics of a new serine protease from *Mucor subtilissimus* URM 4133. *Biotechnology Reports (Amst.)*. 2020, V. 28, article e00552. DOI: 10.1016/j.btre. 2020.e00552
24. Singh S., Pillay B., Prior B. A. Thermal stability of  $\beta$ -xylanases produced by different *Thermomyces lanuginosus* strains. *Enzyme and Microbial Technology*. 2000, V. 26, pp. 502–508. DOI: 10.1016/S0141-0229(00)00193-3
25. Klimenko A.A., Barsukova N.V. Study of foaming properties of aquafaba. *The Latest Achievements of Medicine, Healthcare, and Health-Saving Technologies*. Collection of Work. Kemerovo, Kemerovo State University Publ., 2022, pp. 165–168. DOI: 10.21603/-I-IC-52. (In Russian)
26. Yust M. del M., Milan-Linares M. del C., Alcaide-Hidalgo J. M., Milan F., Pedroche J. Hydrolysis of chickpea proteins with Flavourzyme immobilized on glyoxyl-agarose gels improves functional properties. *Food Science and Technology International*. 2013, V. 19, pp. 217–223. DOI: 10.1177/1082013212442197.

#### Информация об авторах

Андрей Андреевич Клименко – аспирант Высшей школы биотехнологий и пищевых производств

Барсукова Наталья Валерьевна – канд. техн. наук, доцент, доцент Высшей школы биотехнологий и пищевых производств

#### Information about the authors

Andrey A. Klimenko, Postgraduate Student, Higher School of Biotechnology and Food Production

Natalia V. Barsukova, Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Higher School of Biotechnology and Food Production

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 16.09.2025

Одобрена после рецензирования 07.11.2025

Принята к публикации 20.11.2025

The article was submitted 16.09.2025

Approved after reviewing 07.11.2025

Accepted for publication 20.11.2025