

Научная статья

УДК 664.7+664.786.6

DOI: 10.17586/2310-1164-2026-19-3-72-81

Оптимизация параметров предварительной ультразвуковой обработки при ферментативном гидролизе нутового жмыха

А.Д. Николина¹, Н.В. Науменко^{2*}, А.К. Васильева³¹Университет ИТМО, Россия, Санкт-Петербург²Южно-Уральский государственный университет, Россия, Челябинск³Российский университет транспорта, Россия, Москва

*naumenko_natalya@mail.ru

Аннотация. Определяли оптимальные параметры ферментативного гидролиза нутового жмыха, обеспечивающие максимальный выход растворимого белка. Применяли два подхода: гидролиз с использованием ферментного препарата Протозим-С и гидролиз с предварительной ультразвуковой обработкой и последующим добавлением того же фермента. Объектом изучения выбран жмых из нута продовольственного (2-й класс). Исследовали влияние следующих независимых переменных: дозировка ферментного препарата Протозим-С (1–3% от массы сухого сырья), продолжительность ферментативного гидролиза (2–6 ч), а также мощность ультразвукового воздействия (168–336 Вт/л) и его продолжительность (1–5 мин) в случае применения комбинированного метода. Эксперименты проводили с применением методологии поверхности отклика. Определяли содержание растворимого белка (мг/мл) биуретовым микрометодом. Построены адекватные квадратичные модели ($R^2 > 0,95$). Установлено, что наиболее значимым фактором интенсификации процесса является концентрация ферментного препарата. Предварительная ультразвуковая обработка позволяет дополнительно повысить выход белка с 22,1 до 32,3 мг/мл за счет кавитационно-индуцированной деструкции клеточных структур и увеличения доступности белковой матрицы. На основе полученных данных определены оптимальные условия, обеспечивающие максимальный выход белка. При проведении ферментативного гидролиза только с добавлением ферментного препарата: концентрация протеолитического фермента 2,9%, продолжительность 4 ч 48 мин; для комбинированного метода – предварительное ультразвуковое воздействие и внесением на следующем этапе ферментного препарата Протозим-С: мощность ультразвука 346 Вт/л, продолжительность 4,5 мин (в условиях охлаждения), концентрация фермента 2,9% и время гидролиза 4 ч 48 мин. При данных параметрах продукт характеризуется максимальным выходом растворимого белка.

Ключевые слова: биотехнология; ультразвуковая обработка; ферментативный гидролиз; нутовый жмых; растительный белок

Original article

Optimization of ultrasonic pretreatment parameters for enzymatic hydrolysis of chickpea cake

Anna D. Nikolina¹, Natalia V. Naumenko^{2*}, Arina K. Vasilyeva³¹ITMO University, St. Petersburg, Russia²South Ural State University, Chelyabinsk, Russia³Russian University of Transport, Moscow, Russia

*naumenko_natalya@mail.ru

Abstract. The optimal parameters for enzymatic hydrolysis of chickpea cake ensuring the maximum yield of soluble protein and improving the functional properties of protein extracts were determined. Two approaches were investigated: hydrolysis using the enzyme preparation Protozym-S and hydrolysis with preliminary ultrasonic treatment and subsequent addition of the same enzyme. The object of the study was food chickpea cake (2nd class). The effect of the following independent variables was studied: dosage of the enzyme preparation Protozym-S (1–3% of the dry raw material weight), duration of enzymatic hydrolysis (2–6 h), as well as the power of ultrasonic action (168–336 W/l) and its duration (1–5 min) in the case of using a combined method. The study was carried out using response surface methodology. The content of soluble protein (mg/ml) was determined using the biuret micromethod. Adequate quadratic models were built ($R^2 > 0.95$). It has been established that the most significant factor in intensifying the process is the concentration of the enzyme preparation. Preliminary ultrasonic treatment allows for an additional increase in protein yield from 22.1 to 32.3 mg/ml due to cavitation-induced destruction of cellular structures and increased availability of the protein matrix. Based on the data obtained, optimal conditions for ensuring maximum protein yield were determined. When carrying out enzymatic hydrolysis with only the addition of the enzyme preparation: the concentration of the proteolytic enzyme is 2.9%, the duration is 4 hours

48 minutes; for the combined method – preliminary ultrasonic exposure and the addition of the enzyme preparation Protozym-S at the next stage: ultrasound power of 346 W/l, duration of 4.5 minutes (under cooling conditions), enzyme concentration of 2.9% and hydrolysis time of 4 hours 48 minutes. With these parameters, the product is characterized by the maximum yield of soluble protein.

Keywords: biotechnology; ultrasonic treatment; enzymatic hydrolysis; chickpea cake; vegetable protein

Введение

Белок – это высокомолекулярное органическое вещество, состоящее из аминокислот, которое нельзя заменить жирами или углеводами. Он необходим для сохранения мышечной массы, работы иммунитета и регенерации тканей. На питательную ценность белка влияют его аминокислотный состав, биодоступность, усвояемость, наличие антипитательных веществ и способ обработки [1, 2].

Источниками пищевых белков являются продукты животного и растительного происхождения. Белки животного происхождения, хотя и пользуются большим спросом, обычно считаются менее экологически устойчивыми [3–5]. Для поддержания экологического равновесия, повышения доступности и безопасности продовольствия, удовлетворения возрастающих запросов потребителей и преодоления дефицита белка, необходимо постепенно смещать рацион от продуктов животного происхождения в сторону растительных источников [4, 5].

Растительные белки богаты незаменимыми аминокислотами, но они хуже усваиваются из-за высокого содержания пищевых волокон и антипитательных веществ. Растения содержат антипитательные факторы, например танины, которые могут снижать биодоступность полезных веществ, нарушать обменные процессы или оказывать токсичное действие на организм. Это снижает общую эффективность использования белка. Однако обработка продуктов позволяет уменьшить количество таких соединений [2].

Растительные белки, используемые в качестве функциональных ингредиентов в пищевых продуктах, представляют собой доступную и универсальную замену животным белкам [2]. Но для их успешного и полноценного применения требуются инновационные технологические решения, способствующие улучшению усвояемости, биодоступности и функциональных свойств белков растительного происхождения. Такие современные подходы требуют понимания связи структуры белка и его функциональных характеристик [3, 4].

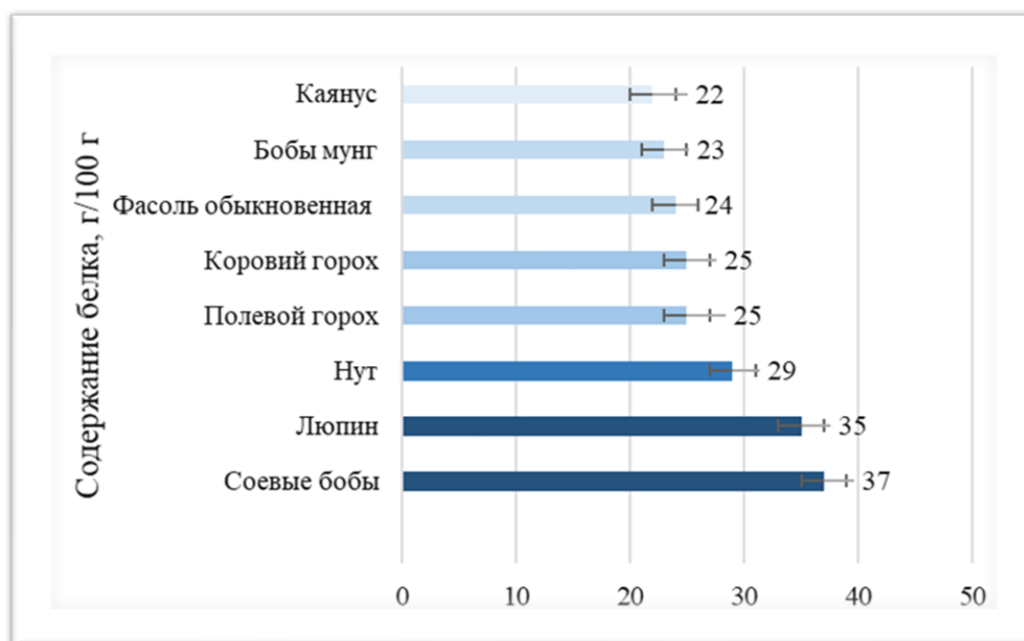


Рисунок 1 – Содержание белка в бобовых, г/100 г

Figure 1. Protein content in legumes, g/100 g

В настоящее время отмечается рост исследований в области получения белковых препаратов из растительных источников белка. Данная тенденция обусловлена глобальным повышением интереса к альтернативным источникам белка, уменьшению потребления животного белка, снижения белкового дефицита в питании населения, а также экологическими соображениями [5–7].

Бобовые являются ценными и полезными ингредиентами как в форме муки, так и в виде белковых концентратов или изолятов, которые считаются экономичным источником белка [8]. Содержание белка в разных видах бобовых неодинаково (рисунок 1) [8].

Нут (*Cicer arietinum L.*), широко известный как гарбанзо или бенгальский горох, занимает третье место по значимости среди бобовых культур. Белок нута характеризуется высокой степенью биодоступности и перевариваемости – в диапазоне 56–89%. Основными белковыми фракциями в нуте выступают альбумины и глобулины, а глютелины и проламины присутствуют в незначительных количествах [8, 9]. Семена нута отличаются низким содержанием метионина и цистеина (серосодержащих аминокислот) при высоком количестве лизина и аргинина [10].

Современные технологии выделения растительных белков включают четыре основные группы методов: сухие, химические, физические и биохимические (рисунок 2). Сухое фракционирование, основанное на помоле и воздушной сепарации, позволяет сохранить нативную структуру белков и снизить ресурсоемкость процесса за счет отсутствия водной фазы, однако характеризуется сравнительно невысоким выходом целевого продукта. Химические методы экстракции, использующие щелочные, кислотные или солевые растворы, обеспечивают получение белковых концентратов и изолятов с высокой степенью очистки, однако их эффективность существенно зависит от параметров среды и может сопровождаться частичной модификацией белковых молекул [11].



Рисунок 2 – Классификация методов извлечения белка

Figure 2. Classification of protein extraction methods

Среди современных подходов особый интерес представляют биохимические методы, основанные на использовании ферментных препаратов. Ферментативная экстракция обеспечивает разрушение клеточных структур растительного сырья в мягких условиях, способствует переходу белка в растворимую форму, снижает содержание антипитательных веществ и повышает биодоступность минеральных компонентов. Благодаря отсутствию агрессивных реагентов данный способ рассматривается как экологически безопасная и перспективная технология получения белковых ингредиентов [12].

К физическим методам интенсификации процесса относятся микроволновая и ультразвуковая обработка, применение которых способствует разрушению клеточных стенок, ускорению массопереноса и повышению эффективности извлечения белка. Микроволновое воздействие обеспечивает быстрый нагрев и сокращение продолжительности экстракции, однако при избыточной обработке может вызывать денатурацию белков. Ультразвуковая обработка основана на эффекте кавитации и позволяет значительно повысить выход белка при сохранении его функциональных свойств, что делает ее одной из наиболее перспективных технологий для переработки растительного сырья. Она основана на кавитации – физическом процессе образования и схлопывания микропузырьков в жидкости [13]. При ультразвуковой обработке сырья разрушаются клеточные стенки, уменьшается размер частиц и ускоряется массоперенос через клеточные мембраны – экстракция целевых веществ [2, 14].

Дополнительно ультразвук изменяет вторичную и третичную структуры белков, вызывает агрегацию и образование поперечных связей, что влияет на гидрофобность, растворимость, эмульгирующие и пенообразующие свойства экстрагированного белка. Эффективность данного метода зависит от значений температуры, типа реактора, его частоты и мощности, наличия и вида экстрагента. Ультразвуковая обработка привлекает внимание исследователей благодаря своей высокой производительности, энергосбережению, минимальному использованию химических реагентов и сохранению функциональных свойств целевого продукта [2, 15].

Применение ультразвуковой экстракции белков сокращает время извлечения целевого продукта, снижает энергозатраты и расход растворителей, повышает скорость энергопереноса. Ультразвуковая обработка широко применяется для извлечения белков из растительного и животного сырья, обеспечивая увеличение выхода экстракции по сравнению с традиционными методами [2].

Существуют недостатки и определенные ограничения в применении данного вида обработки сырья: при высокой мощности и длительной обработке ультразвук может изменять структуру белка, вызывать денатурацию и ухудшать его функциональные свойства [2, 16].

В исследованиях А.А. Фабрицкой, С.О. Семенихина и др. отмечается [16] потенциал применения для экстракции белка из растительного сырья комбинации ферментативной и ультразвуковой обработки. Авторы отмечают повышение активности ферментов при их применении вместе с ультразвуком при оптимальных параметрах.

Цель данного исследования – проанализировать влияние параметров ультразвуковой обработки на эффективность ферментативного гидролиза нутевого жмыха и установить оптимальные режимы ультразвукового воздействия.

Объекты и методы исследования

Объектом изучения стал нутево́ый жмых из нута продовольственного 2-го класса, произведенного ООО «Объединение «Союзпищепром» (Челябинск, Россия).

Эксперимент по выделению белка из нутевого жмыха проводили с использованием двух подходов: ферментативного гидролиза и ферментативного гидролиза с предварительной ультразвуковой (УЗ) обработкой. Для ферментации использовали протеолитический комплекс Протозим-С (Биопрепарат, Россия), полученный культивированием штамма *Acetomonium chrysogenum*, с заявленной производителем активностью фермента 50 000 ед/г, в трех дозировках – от 1 до 3% от массы сухого вещества (СВ) при вариации длительности процесса ферментативного гидролиза 2–6 ч.

В качестве контрольного образца использовали водную экстракцию нутевого жмыха без дополнительных воздействий при гидромодуле 1:5.

Для проведения эксперимента и поиска наиболее эффективного количества используемого фермента и длительности его воздействия были определены образцы, представленные в таблице 1.

Таблица 1. Условия ферментативного гидролиза опытных образцов
Table 1. Conditions for enzymatic hydrolysis of test samples

Образец	Количество вносимого фермента, % СВ	Длительность воздействия фермента, часы
1.1	1	2
1.2	1	4
1.3	1	6
1.4	2	2
1.5	2	4
1.6	2	6
1.7	3	2
1.8	3	4
1.9	3	6

На следующем этапе исследования для повышения эффективности процесса ферментативного гидролиза применили предварительное ультразвуковое воздействие (УЗВ) при следующих вариантах воздействия: 40% (168 Вт/л), 60% (252 Вт/л) и 80% (336 Вт/л) от предельной удельной мощности 420 Вт/л, продолжительность обработки варьировалась 1–5 мин, для этого использовали прибор Волна модель УЗТА-0,4/22-ОМ (Россия) при частоте $22 \pm 1,6$ кГц и максимальной мощности 420 Вт/л. Для проведения эксперимента и поиска наиболее эффективных параметров воздействия были определены образцы, представленные в таблице 2.

Таблица 2. Условия предварительного УЗВ опытных образцов
Table 2. Conditions of preliminary ultrasonic treatment of test samples

Образец	Мощность УЗВ, Вт/л	Длительность УЗВ, мин
2.1	168	1
2.2	168	3
2.3	168	5
2.4	252	1
2.5	252	3
2.6	252	5
2.7	336	1
2.8	336	3
2.9	336	5

Массовую долю белка определяли по методу биуретового микрометода. Для этого к навеске нутового жмыха добавляли смесь спиртового раствора щелочи гидроксида натрия и растворителя – 50% этанола, смесь оставляли на 1 ч. Далее смесь центрифугировали и фильтровали. Затем к получившемуся раствору добавляли биуретовый реактив. Смесь выдерживали в термостате 10 мин при температуре 40°C и 20 мин при комнатной температуре, далее определяли оптическую плотность раствора. Концентрацию белка рассчитывали по формуле

$$x = \frac{a \cdot V_1}{m_{\text{нав}} \cdot V_2},$$

где a – количество белка, мг;

$m_{\text{нав}}$ – масса навески, г;

V_1 – объем исходной вытяжки, мл;

V_2 – объем фильтрата, взятого для анализа, мл.

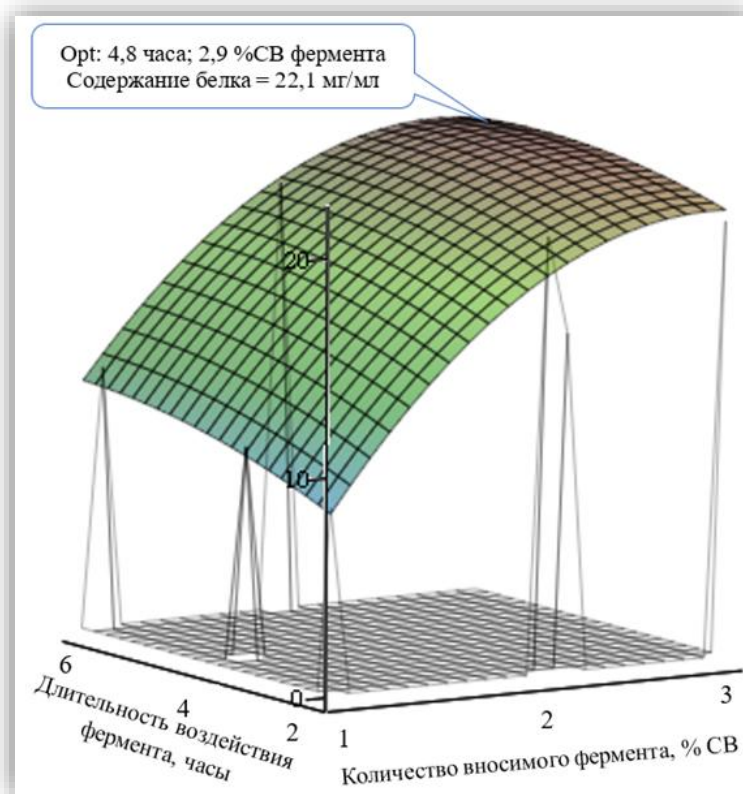
Все исследования проводились как минимум в трехкратной повторности. Экспериментальные данные анализировались статистическими методами в программе Microsoft Excel и Mathcad 14. Все полученные значения представлены с уровнем достоверности 95%.

Для создания графических абстракций (рисунок 2 и рисунок 5) использовали генеративную модель искусственного интеллекта ChatGPT (OpenAI, GPT-5.5, версия на момент подготовки рукописи) совместно с инструментом генерации изображений DALL·E (OpenAI). Входными данными для генерации являлись разработанные авторами текстовые описания структуры технологического процесса, классификации методов извлечения белка, результатов исследований, а также анализа процессов, происходящих при ферментативном гидролизе с предварительным ультразвуковым

воздействием. Использование искусственного интеллекта ограничивалось задачами графического дизайна и визуализации.

Результаты и их обсуждение

По результатам проведенных исследований установлено, что увеличение дозировки ферментного препарата Протозим-С и продолжительности гидролиза способствует повышению содержания растворимого белка в экстрактах нутового жмыха (рисунок 3).



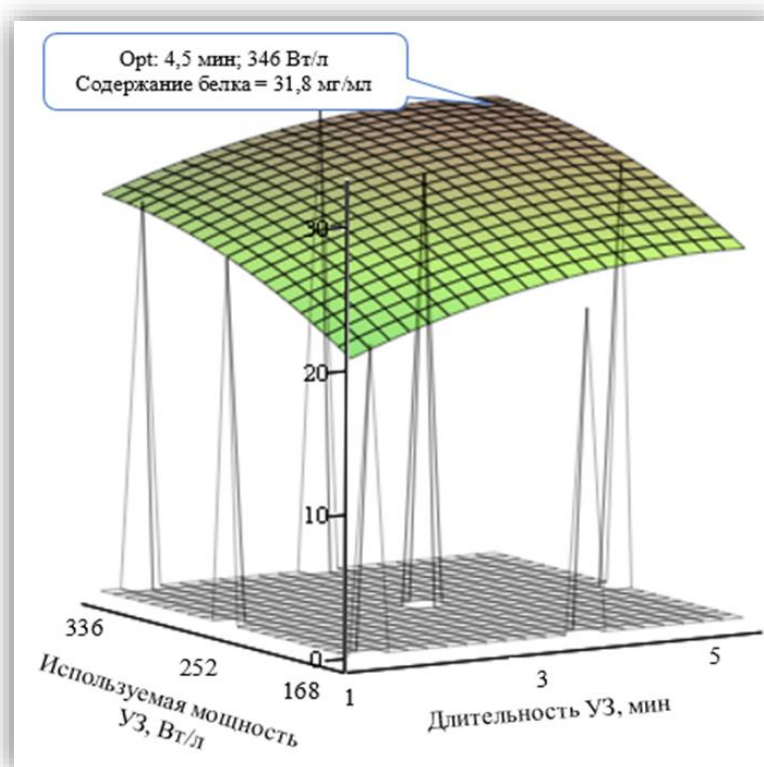
$$Y = -2,7 \cdot X_1^2 - 0,312 \cdot X_2^2 - 0,238 \cdot X_1 \cdot X_2 + 17,317 \cdot X_1 + 3,7 \cdot X_2 - 12,667$$

Рисунок 3 – Влияние дозировки и продолжительности действия фермента Протозим-С на процесс гидролиза
Figure 3. Effect of Protozyme-C dosage and duration on the hydrolysis process

При внесении 1% фермента содержание белка возрастало с 8,5 до 11,8 мг/мл по мере увеличения времени гидролиза с 2 до 6 ч. Повышение дозировки препарата до 2% обеспечивало рост данного показателя до 15,4–19,9 мг/мл. Наиболее высокие значения были получены при использовании 3% фермента, тогда содержание белка достигало 19,8–22,1 мг/мл.

Анализ поверхности отклика показал, что определяющим фактором интенсификации процесса является концентрация ферментного препарата. При этом увеличение продолжительности гидролиза свыше 4 ч не приводило к дальнейшему росту содержания белка: данный показатель выходил на верхнее плато, а в отдельных вариантах незначительно снижался. Максимальная концентрация белка (22,3 мг/мл) была достигнута при дозировке фермента 3% и продолжительности гидролиза 6 ч.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что применение ферментативной обработки обеспечивает эффективное разрушение белково-полисахаридной матрицы нутового жмыха и способствует переходу белковых компонентов в растворимую форму. Проведенная оптимизация позволила определить наиболее рациональные режимы ферментативного гидролиза с использованием препарата Протозим-С в количестве 2,9% от массы СВ при продолжительности процесса 4 ч 48 мин. Данные параметры были использованы в дальнейших исследованиях для определения возможности применения УЗВ для интенсификации данного процесса (рисунок 4).



$$Y = -0,354 \cdot X_1^2 - 1,937 \cdot 10^{-4} \cdot X_2^2 - 1,339 \cdot 10^{-3} \cdot X_1 \cdot X_2 + 3,604 \cdot X_1 + 0,14 \cdot X_2 - 0,447$$

Рисунок 4 – Влияние мощности и продолжительности предварительного УЗВ на эффективность ферментативного гидролиза

Figure 4. Effect of preliminary ultrasonic treatment power and duration on enzymatic hydrolysis

Результаты оптимизации параметров предварительной ультразвуковой обработки показали, что как мощность, так и продолжительность УЗВ оказывают существенное влияние на эффективность последующего ферментативного гидролиза нутевого жмыха. В исследуемом диапазоне условий содержание белка в экстрактах изменялось от 21,5 до 32,3 мг/мл, что значительно превысило показатели, полученные при использовании только ферментативной обработки.

При мощности УЗВ 168 Вт/л увеличение длительности обработки с 1 до 5 мин сопровождалось последовательным ростом содержания белка с 21,5 до 26,8 мг/мл. Аналогичная тенденция наблюдалась при мощности 252 Вт/л, где концентрация белка возрастала от 25,4 до 29,4 мг/мл. Наиболее высокие значения были получены при использовании мощности 336 Вт/л, обеспечивающей содержание белка в диапазоне 26,8–31,8 мг/мл.

Анализ поверхности отклика показал, что усиление мощности ультразвукового воздействия способствует более интенсивному разрушению клеточных структур нутевого жмыха и повышению доступности белковых компонентов для последующего действия протеолитического комплекса. При этом увеличение продолжительности обработки до 3 мин обеспечило наиболее выраженный рост показателя, тогда как дальнейшее воздействие в течение 5 мин сопровождалось незначительным снижением содержания белка.

Таким образом, предварительное УЗВ является эффективным способом интенсификации ферментативного гидролиза нутевого жмыха. На основании проведенной оптимизации были определены наилучшие режимы: при мощности 346 Вт/л в течение 4,5 мин в условиях охлаждающей рубашки с последующим внесением ферментативного препарата в количестве 2,9%СВ и проведением процесса гидролиза в течение 4 ч 48 мин, обеспечивающего максимальный выход растворимых белковых компонентов.

Основываясь на анализе ряда исследований, представленных в открытой печати [12, 13, 2], возможно предположить механизм процессов, происходящих при ферментативном гидролизе с предварительным УЗВ, представленный на рисунке 5.

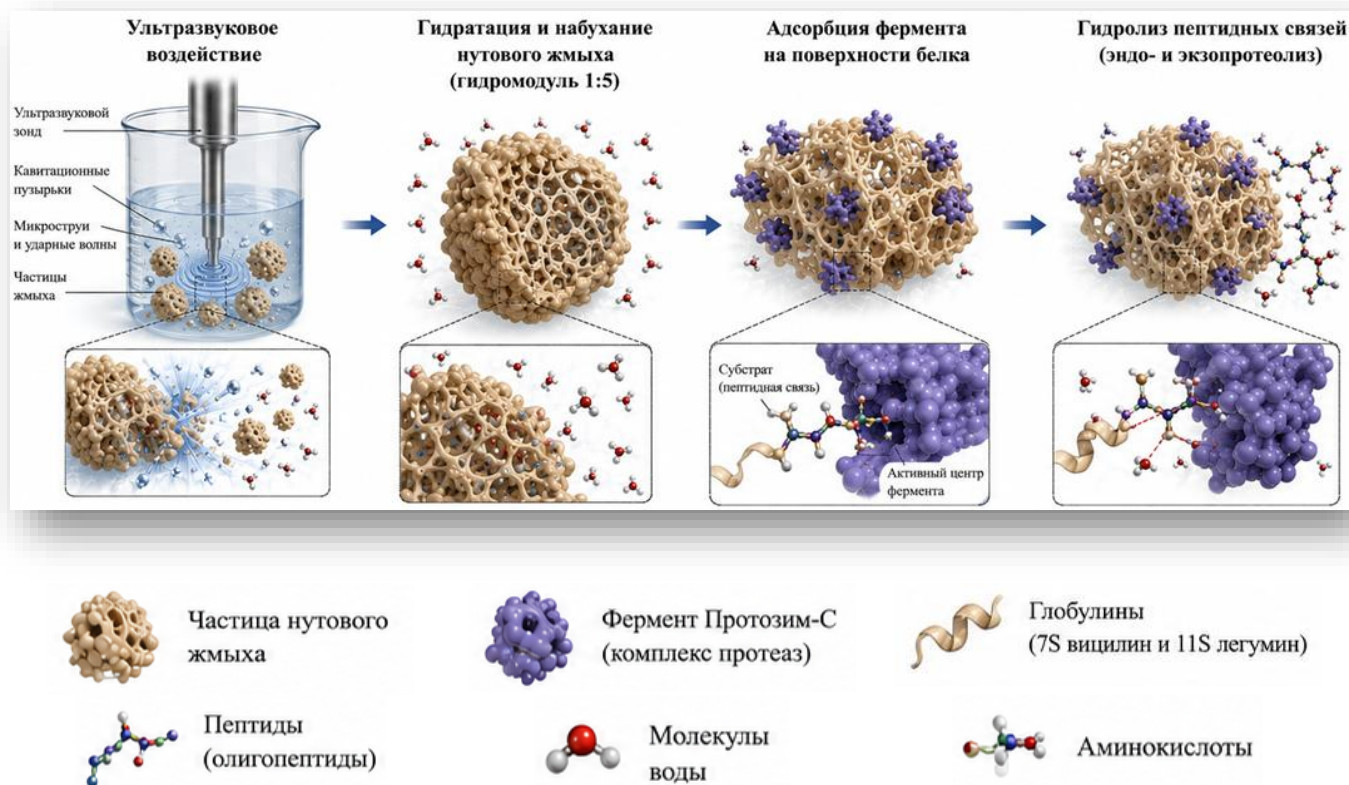


Рисунок 5 – Предполагаемый механизм ферментативного гидролиза после УЗВ [2, 12, 13]
 Figure 5. Proposed mechanism of enzymatic hydrolysis following ultrasonic pretreatment [2, 12, 13]

На основе анализа полученных данных возможно предположить, что в условиях гидро модуля при ультразвуковой обработке в суспензии нутового жмыха происходит быстрая кавитационно-индуцированная физическая модификация белковой матрицы. Благодаря данному процессу возникает ускоренная гидратация частиц и деструктурирование поверхностных слоев жмыха, распад рыхлых белковых агломератов, частичное разворачивание глобулинов, изменение вторичной и третичной структуры белка, увеличение доступности гидрофильных и заряженных групп и переход части белка в более растворимое или коллоидно-дисперсное состояние. Кинетика процесса двухстадийная: вначале преобладает кавитационно-механическая дезагрегация с быстрым ростом выхода белка в жидкую фазу.

После гидратации и набухания матрицы протеолитический комплекс Протозим-С адсорбируется на поверхности доступных участков белковых агломератов и катализирует гидролиз пептидных связей, что приводит к постепенному разрушению высокомолекулярных белковых матриц. В результате образуются низкомолекулярные пептиды и растворимые белковые фракции, характеризующиеся повышенной растворимостью и способностью переходить в жидкую фазу экстракта. Совокупное действие ультразвуковой обработки и ферментативного гидролиза обеспечивает интенсификацию массопереноса, увеличение выхода растворимого белка и более эффективное извлечение белковых компонентов из белково-полисахаридной матрицы нутового жмыха.

Заключение

В ходе работы установлены оптимальные параметры комбинированного метода переработки нутового жмыха, обеспечивающие высокий выход растительного белка: мощность УЗВ 346 Вт/л, продолжительность 4,5 мин (в условиях охлаждения), концентрация протеолитического фермента 2,9% и время проведения гидролиза 4 ч 48 мин. Экспериментально подтверждена высокая эффективность предварительного ультразвукового воздействия на эффективность ферментативного гидролиза нутового жмыха для извлечения белковых компонентов. Для дальнейшего масштабирования и внедрения в промышленное производство данной технологии получения белковых ингредиентов на основе нутового жмыха требуются дополнительные исследования.

Литература

1. Колтакова В.В., Бызов В.А. Функциональные характеристики и молекулярно-структурная модификация растительных белков. Обзор // Пищевые системы. 2024. Т. 7. № 3. С. 324–335. DOI: 10.21323/2618-9771-2024-7-3-324-335
2. Chandran A.S., Suri Sh., Choudhary P. Sustainable plant protein: an up-to-date overview of sources, extraction techniques and utilization. *Sustainable Food Technology*. 2023, V. 1, no. 4, pp. 466–483. DOI: 10.1039/d3fb00003f
3. Бикбулатов П.С., Чугунова О.В., Заворохина Н.В. Анализ современного рынка растительных белков и технологических решений их получения // Вестник КрасГАУ. 2025. № 5. С. 244–260. DOI: 10.36718/1819-4036-2025-5-244-260
4. Langan S., Yadava, P. Belwal T., Kaul T. Editorial: Sustaining protein nutrition through plant-based foods: A paradigm shift. *Front Sustain Food Syst*. 2022, V. 6, article 1037086. DOI: 10.3389/fsufs.2022.1037086
5. Бурак Л.Ч., Егорова З.Е., Саманкова Н.В. Альтернативные источники белка и современные методы его извлечения: обзор предметного поля // Sciences of Europe. 2024. № 150. С. 10–23. DOI: 10.5281/zenodo.13926294
6. Апынцева Ю.В., Борисова И.И., Бараненко Д.А. Обзор технологий выделения белка из нута // Ползуновский вестник. 2024. № 2. С. 27–36. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.02.004
7. Шагинова Л.О., Крылова И.В., Демьяненко Т.Ф., Доморощенкова М.Л. Исследование процесса получения белкового препарата из семян подсолнечника для использования в пищевой промышленности // Новые технологии. 2021. Т. 17. № 3. С. 41–50. DOI: 10.47370/2072-0920-2021-17-3-41-50
8. Singh N., Jain P., Ujainwal M., Langan S. Escalate protein plates from legumes for sustainable human nutrition. *Frontiers in Nutrition*. 2022, V. 9, article 977986. DOI: 10.3389/fnut.2022.977986.
9. Крылова И.В., Федоров А.В., Доморощенкова М.Л. [и др.] Влияние состава подсолнечного шрота на эффективность отделения белковой части сырья от клетчатки методом механического фракционирования // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2024. № 1. С. 3–13. DOI: 10.17586/2310-1164-2024-17-1-3-13
10. Kaur R., Prasad K. Technological, processing and nutritional aspects of chickpea (*Cicer arietinum*) - A review. *Trends in Food Science & Technology*. 2021, V. 109, pp. 448–463. DOI: 10.1016/j.tifs.2021.01.044
11. Jadhav H.B., Das M., Das A., G. V., Choudhary P., Annapure U., Alaskar K. Enhancing the functionality of plant-based proteins with the application of ultrasound – A review. *Measurement: Food*. 2024, V. 13, article 100122. DOI: 10.1016/j.meaf00.2024.100139
12. Kang S., Zhang J., Guo X., Lei Y., Yang M. Effects of ultrasonic treatment on the structure, functional properties of chickpea protein isolate and its digestibility in vitro. *Foods*. 2022, V. 11, no. 6, article 880. DOI: 10.3390/foods11060880
13. Patil N.D., Bains A., Sridhar K., Bhaswant M., Kaur S., Tripathi M., Lanterbecq D., Chawla P., Sharma M. Extraction, modification, biofunctionality, and food applications of chickpea (*Cicer arietinum*) protein: An up-to-date review. *Foods*. 2024, V. 13, no. 9, article 1398. DOI: 10.3390/foods13091398
14. Колтакова В.В., Куликов Д.С., Уланова Р.В., Чумикина Л.В. Пищевые и кормовые белковые препараты из гороха и нута: производство, свойства, применение // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 2. С. 333–348. DOI: 10.21603/2074-9414-2021-2-333-348
15. Клименко А.А., Барсукова Н.В. Оценка методов модификации пенообразующих свойств экстрактов нута // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2025. № 4. С. 26–35. DOI: 10.17586/2310-1164-2025-18-4-26-35
16. Фабрицкая А.А., Семенхин С.О., Городецкий В.О. и др. Современные исследования в области интенсификации процесса экстракции биологически активных веществ из растительного сырья с применением ферментов // Новые технологии. 2021. Т. 17. № 2. С. 56–66. DOI: 10.47370/2072-0920-2021-17-2-56-66.

References

1. Kolpakova V.V., Byzov V.A. Functional characteristics and molecular-structural modification of plant proteins. Review. *Food Systems*. 2024, V. 7, no. 3, pp. 324–335. DOI: 10.21323/2618-9771-2024-7-3-324-335. (In Russian)
2. Chandran A.S., Suri Sh., Choudhary P. Sustainable plant protein: an up-to-date overview of sources, extraction techniques and utilization. *Sustainable Food Technology*. 2023, V. 1, no. 4, pp. 466–483. DOI: 10.1039/d3fb00003f
3. Bikbulatov P.S., Chugunova O.V., Zavorokhina N.V. Analysing the current market of plant proteins and technological solutions for their production. *Bulletin of KSAU*. 2025, no. 5, pp. 244–260. DOI: 10.36718/1819-4036-2025-5-244-260. (In Russian)
4. Langan S., Yadava, P. Belwal T., Kaul T. Editorial: Sustaining protein nutrition through plant-based foods: A paradigm shift. *Front Sustain Food Syst*. 2022, V. 6, article 1037086. DOI: 10.3389/fsufs.2022.1037086
5. Burak L.Ch., Egorova Z.E., Samankova N.V. Alternative sources of protein and modern methods of their extraction: A review of the subject field. *Sciences of Europe*. 2024, no. 150, pp. 10–23. DOI: 10.5281/zenodo.13926294. (In Russian)

6. Apyantseva Yu.V., Borisova I.I., Baranenko D.A. Review of chickpea isolation technologies. *Polzunovskiy Vestnik*. 2024, no. 2, pp. 27–36. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.02.004. (In Russian)
7. Shaginova L.O., Krylova I.V., Demyanenko T.F., Domoroshchenkova M.L. Study of a process of obtaining of protein preparation from sunflower seeds for application in food industry. *New Technologies*. 2021, V. 17, no. 3, pp. 41–50. DOI: 10.47370/2072-0920-2021-17-3-41-50. (In Russian)
8. Singh N., Jain P., Ujainwal M., Langyan S. Escalate protein plates from legumes for sustainable human nutrition. *Frontiers in Nutrition*. 2022, V. 9, article 977986. DOI: 10.3389/fnut.2022.977986
9. Krylova I.V., Fedorov A.V., Domoroshchenkova M.L., et al. Influence of the composition of sunflower meal on the efficiency of separating the protein part of the raw material from the fiber by mechanical fractionation. *Processes and Food Production Equipment*. 2024, no. 1, pp. 3–13. DOI: 10.17586/2310-1164-2024-17-1-3-13. (In Russian)
10. Kaur R., Prasad K. Technological, processing and nutritional aspects of chickpea (*Cicer arietinum*) – A review. *Trends in Food Science & Technology*. 2021, V. 109, pp. 448–463. DOI: 10.1016/j.tifs.2021.01.044
11. Jadhav H.B., Das M., Das A., G. V., Choudhary P., Annapure U., Alaskar K. Enhancing the functionality of plant-based proteins with the application of ultrasound – A review. *Measurement: Food*. 2024, V. 13, article 100122. DOI: 10.1016/j.meaf00.2024.100139
12. Kang S., Zhang J., Guo X., Lei Y., Yang M. Effects of ultrasonic treatment on the structure, functional properties of chickpea protein isolate and its digestibility in vitro. *Foods*. 2022, V. 11, no. 6, article 880. DOI: 10.3390/foods11060880
13. Patil N.D., Bains A., Sridhar K., Bhaswant M., Kaur S., Tripathi M., Lanterbecq D., Chawla P., Sharma M. Extraction, modification, biofunctionality, and food applications of chickpea (*Cicer arietinum*) protein: An up-to-date review. *Foods*. 2024, V. 13, no. 9, article 1398. DOI: 10.3390/foods13091398
14. Kolpakova V.V., Kulikov D.S., Ulanova R.V., Chumikina L.V. Food and feed protein preparations from peas and chickpeas: Production, properties, and application. *Food Processing Engineering*. 2021, V. 51, no. 2, pp. 333–348. DOI: 10.21603/2074-9414-2021-2-333-348. (In Russian)
15. Klimenko A.A., Barsukova N.V. Methods of modifying the foaming properties of chickpea extracts. *Processes and Food Production Equipment*. 2025, no. 4, pp. 26–35. DOI: 10.17586/2310-1164-2025-18-4-26-35. (In Russian)
16. Fabritskaya A.A., Semenikhin S.O., Gorodetsky V.O., et al. Modern research on the extraction of biologically active substances from plant raw materials using enzymes. *New Technologies*. 2021, V. 17, no. 2, pp. 56–66. DOI: 10.47370/2072-0920-2021-17-2-56-66. (In Russian)

Информация об авторах

Анна Дмитриевна Николина – аспирант факультета биотехнологий

Наталья Владимировна Науменко – д-р. техн. наук, доцент, профессор кафедры пищевых и биотехнологий

Арина Константиновна Васильева – бакалавр кафедры цифровых технологий управления транспортными процессами

Information about the authors

Anna D. Nikolina, Postgraduate Student, Department of Biotechnology

Natalia V. Naumenko, D. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Food and Biotechnology

Arina K. Vasilyeva, Bachelor, Department of Digital Technologies for Managing Transport Processes

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

Статья поступила в редакцию 18.06.2026

Одобрена после рецензирования 07.07.2026

Принята к публикации 14.07.2026

The article was submitted 18.06.2026

Approved after reviewing 07.07.2026

Accepted for publication 14.07.2026