

Актуальные проблемы развития пищевых и биотехнологий

Topical issues of development of food and biological technologies

Научная статья
УДК 664.38:635.656
DOI: 10.14529/food230401

ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОДОВОЛЬСТВЕННЫХ РЕСУРСОВ В ТЕХНОЛОГИИ ПИЩЕВЫХ СИСТЕМ

Л.Н. Рождественская^{1,2}, *rozhddestvenskaya@corp.nstu.ru*
*О.В. Чугунова*³, *chugunova@usue.ru*

¹ Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

² Новосибирский научно-исследовательский институт гигиены Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Новосибирск, Россия

³ Уральский государственный экономический университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Одним из ключевых трендов в пищевой индустрии становится разработка продуктов, которые не только характеризуются высоким качеством, но и соответствуют принципам экологической чистоты и энергетически сбалансированы. Бобовые растения изучаются как способ решения проблемы недостаточности белка и формирования адекватного и качественного питания быстрорастущего населения мира. Цель исследования – поиск решений и оценка имеющихся подходов к технологиям переработки растительных белков на примере горохового белка, включая такие этапы переработки, как: экстрагирование, фракционирование, модификация. Экстрагирование белковой фракции сои и гороха на основе традиционных способов уже получило индустриальное решение. В то же время развиваются экоинновационные подходы, объединяющие сверхкритическую экстракцию диоксидом углерода, субкритическую водную экстракцию, методы, основанные на использовании ультразвука, давления, плазмы и пр. Особое значение для рационального и устойчивого производства имеет проблема фракционирования и модификации получаемых в ходе экстрагирования продуктов. Потенциальный спектр использования этих продуктов определяется их функционально-технологическими свойствами, которые напрямую зависят от молекулярных характеристик отдельных белковых фракций. В работе проведен анализ технических решений в области модификации растительного белка, в т. ч. химических, физических и биологических. В зависимости от сути применяемых методов и достигаемых в ходе модификации эффектов определены основные зависимости и ограничения. Рассмотрены вызовы, обуславливающие сложности при подборе и унификации методов экстрагирования, фракционирования и модификации при их применении к различным видам бобовых и даже сортам одного вида. Установлено на примере продуктов поэтапной переработки гороха (мука, концентрат, изолят, отдельные фракции белка), что функционально-технологические свойства продуктов в значительной степени зависят от методов, используемых для их производства, степени изменений белковой структуры, соотношения отдельных фракций белка и их изначальных физико-химических свойств (аминокислотного профиля, структуры, конформации, заряда, гидрофобности, размера и др.).

Ключевые слова: белок бобовых, экстракция белка, фракционирование белка, модификация белка, гороховый белок, изоляты горохового белка

Для цитирования: Рождественская Л.Н., Чугунова О.В. Технические решения для эффективного использования продовольственных ресурсов в технологии пищевых систем // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». 2023. Т. 11, № 4. С. 6–18. DOI: 10.14529/food230401

Original article

DOI: 10.14529/food230401

TECHNICAL SOLUTIONS FOR THE EFFECTIVE USE OF FOOD RESOURCES IN FOOD SYSTEMS TECHNOLOGY

L.N. Rozhdestvenskaya^{1,2}, rozhdestvenskaya@corp.nstu.ru**O.V. Chugunova**³, chugunova@usue.ru¹ Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia² Novosibirsk Research Institute of Hygiene of the Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Welfare, Novosibirsk, Russia³ Ural State University of Economics, Yekaterinburg, Russia

Abstract. One of the key trends in the food industry is the development of products that are not only characterized by high quality, but also comply with the principles of environmental cleanliness and energy balance. Legumes are being studied as a way to solve the problem of protein deficiency and provide adequate and high-quality nutrition to the rapidly growing world population. The purpose of the study is to find solutions and evaluate existing approaches to technologies for processing plant proteins, using the example of pea protein, including such processing stages as: extraction, fractionation, modification. Extraction of the protein fraction of soybeans and peas based on traditional methods has already received an industrial solution. At the same time, eco-innovative approaches are being developed that combine supercritical extraction with carbon dioxide, subcritical aqueous extraction, methods based on the use of ultrasound, pressure, plasma, etc. Of importance for rational and sustainable production is the problem of fractionation and modification of products obtained during extraction. The potential range of use of these products is determined by their functional and technological properties, which directly depend on the molecular characteristics of individual protein fractions. The work analyzes technical solutions in the field of modification of vegetable protein, incl. chemical, physical and biological. Depending on the essence of the methods used and the effects achieved during the modification, the main dependencies and limitations are determined. The challenges that cause difficulties in the selection and unification of extraction, fractionation and modification methods when applied to different types of legumes and even varieties of the same species are considered. It has been established using the example of products of stage-by-stage processing of peas (flour, concentrate, isolate, individual protein fractions) that the functional and technological properties of products largely depend on the methods used for their production, the degree of changes in the protein structure, the ratio of individual protein fractions and their initial physical and chemical properties (amino acid profile, structure, conformation, charge, hydrophobicity, size, etc.).

Keywords: legume protein, protein extraction, protein fractionation, protein modification, plant proteins, pea protein, pea protein isolates

For citation: Rozhdestvenskaya L.N., Chugunova O.V. Technical solutions for the effective use of food resources in food systems technology. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnology*, 2023, vol. 11, no. 4, pp. 6–18. (In Russ.) DOI: 10.14529/food230401

Введение

Для решения вопросов продовольственной безопасности Правительство РФ активно внедряет существенные меры. Эти действия нацелены на создание благоприятных условий для отечественных производителей, включая активное замещение импортных товаров и сырья собственными аналогами. Кроме того, осуществляется поддержка инновационных технологий, направленных на решение проблемы дефицита белка.

Проблема недостатка продовольствия для увеличивающегося населения земли также неоднократно озвучивалась на международной повестке и является основной акцентной мыслью, пронизывающей практически все Цели устойчивого развития [1]. Отдельным вопросом выносятся не только энергетическая достаточность совокупно производимого пищевого ресурса, но и его биологическая ценность, поскольку белок является необходимым для выживания человечества макроэле-

ментом, а его качество напрямую влияет на качество жизни и функционирование основных систем организма человека, в т. ч. иммунную [2, 3]. Одним из ключевых трендов в пищевой индустрии становится разработка продуктов, которые не только характеризуются высоким качеством, но и соответствуют принципам экологической чистоты и энергетически сбалансированы [4].

Однако необходимо учитывать, что ресурсы планеты достаточно ограничены, особенно в отношении производства животного белка, поэтому последние десятилетия именно растительные белки воспринимаются как многообещающая, более экологически устойчивая и экономически эффективная альтернатива. В то же время активное использование растительных белков сталкивается с целым рядом ограничений и вызовов: наличие антипитательных веществ, низкое содержание незаменимых аминокислот, низкая функциональность (растворимость, эмульгирование и гелеобразование, пенообразование), а самое существенное – технологии получения и использования при производстве пищевых продуктов растительных белков находятся на этапе формирования [5].

В связи с обозначенной проблемой целью данного исследования являлся поиск решений и оценка имеющихся подходов к технологиям переработки растительных белков на примере горохового белка, включая такие этапы переработки как: экстрагирование, фракционирование, модификация.

Традиционные технологии переработки бобовых в продукты питания предусматривают обязательные технологические операции, в результате которых фракционируются биологически ценные компоненты [6]. Перспективность использования получаемых на разных этапах продуктов напрямую зависит от их функциональных характеристик, с одной стороны, и уровня развития производственной структуры, с другой. Применительно к отечественной индустрии питания важно отметить, что данное направление является перспективным с точки зрения развития собственных биотехнологических решений, поскольку спрос на белковые ингредиенты растительного происхождения (plant-based protein ingredients – PBPis) в пищевом секторе за последние годы значительно увеличился и имеет стабильную тенденцию к дальнейшему росту. А поскольку эти ингредиенты производятся с

использованием широкого спектра технологических процессов, которые влияют на их конечные характеристики, то и перспективы их использования для создания новых видов пищевых и блюд более чем значительны.

Объекты и методы исследований

Для достижения указанной цели нами был осуществлен отбор первичных источников, содержащихся на специализированных сайтах научных публикаций, в отечественных и международных реферативных базах данных PubMed, WoS, Scopus, Global Health, Lancet, ScienceDirect, Elsevier, ResearchGate, eLIBRARY.RU и ScienceDaily, преимущественно за период с 2012 по 2022 гг., удовлетворяющих требованиям научной достоверности и полноты. Ключевые слова для поиска: legume protein, protein extraction, plant proteins, pea protein, pea protein products, plant-based protein ingredients, pea protein isolates. В работе использовались структурно-логический, аналитический и аксиоматический методы. В качестве основного метода анализа использовался традиционный (качественный) контент-анализ обзорных статей и документов, который проводился в рамках кабинетного исследования.

Результаты и их обсуждение

На первом этапе обзора используемой для технологической переработки сырьевой базы проведенный анализ литературных источников и патентной информации показал, что существуют особенности, позволяющие установить терминологические отличия при классификации бобовых в отечественных и зарубежных материалах. Установлено, что Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций (ФАО) признает 11 видов бобовых: dry beans, dry broad beans, dry peas, chickpeas, cow peas, pigeon peas, lentils, Bambara beans, vetches, lupins and pulses (бобовые, которые не попадают ни в одну из других категорий). В материалах отечественных исследователей в группу зерновых бобовых растений включают сою, горох, фасоль, чечевицу, бобы, нут, чину, арахис, голубиный горох, бархатные бобы, канавалию и вигну, при этом все перечисленные растения относятся к семейству бобовых, подсемейству мотыльковых [7]. Содержание белка в бобовых значительно различается в зависимости от культуры, сорта, географического происхождения и применяемых технологий выращивания (от 16 до 44 %) [8] (табл. 1).

Таблица 1
Среднее значение пищевой ценности основных видов бобовых

Вид	Содержание, %		
	белок	углеводы	жир
Горох	22,9	41,2	1,1
Фасоль	21,3	40,1	1,6
Чечевица	23,5	52,0	3,4
Кормовые бобы	23,0	55,0	2,0
Нут	19,8	41,2	3,4
Чина	23,0	55,0	1,5
Вика посевная	26,0	29,8	1,7
Люпин желтый	43,9	28,9	5,4
Люпин белый	37,6	35,9	8,8
Соя	34,9	17,3	17,3

* Источник: Зернобобовые России. Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций. Москва, 2017. URL: <http://www.fao.org/3/a-i7136r.pdf>

На втором этапе исследования в соответствии с целью проведена оценка имеющихся подходов и технологических решений экстрагирования растительных белков.

Существующие технические решения и особенности получения продуктов переработки сои можно условно выделить в отдельную группу, поскольку содержание жира в сое значительно выше, чем в остальных бобовых культурах, и в большинстве источников, отражающих статистику производства сырья в мире, она учитывается, в первую очередь, как масленичная культура. Именно этим обусловлена широкая популярность возделывания сои, наличие достаточного количества генномодифицированных сортов и широчайший спектр как её промышленного использования, так и получаемых в ходе её переработки продуктов: молоко, соевый творог, соевый соус и масло, соевые сухие сливки, соевый майонез, йогурт, кефир, сыр тофу и окара, мисо-паста, а из структурированной сои или с добавлением соевого белка – вареная и копченая колбаса, гуляш, шницель, бефстроганов, котлеты, сосиски и сардельки [9].

Среди остальных бобовых наибольший интерес, как относительно новый вид растительного белка, с точки зрения пищевого промышленного использования получил горох. Это обусловлено двумя факторами. Во-

первых, несмотря на перспективность возделывания таких высокобелковых культур, как, например, люпин, горох стабильно последние десятилетия занимает ведущее место среди всех отечественных возделываемых бобовых культур и является одной из пяти ключевых экспортных позиций. Так, в 2022 году Россия собрала 3,6 млн т гороха, а в 2023 году, по предварительным данным Росстата, посевные площади гороха в России составили 1899,6 тыс. га, что на 17,1 % (на 277,9 тыс. га) больше, чем в 2021 году. Это наибольший показатель с 1993 года. Во-вторых, горох содержит достаточно полноценный комплекс аминокислот, включая наиболее редкие для растительного сырья незаменимые аминокислоты (лизин, треонин и серосодержащие цистеин и метионин).

Гороховый белок является одним из немногих коммерчески доступных растительных белков, которые все чаще применяются в промышленности, благодаря своей экономической эффективности, физической доступности, высокой пищевой и биологической ценности, функциональности и тому, что он не является генетически модифицированным организмом (ГМО), не содержит глютена и имеет низкую аллергенность [10]. На современном мировом рынке РВРIs гороховый белок представлен в формах гороховой муки, концентратов, изолятов, экструдатов и гидролизатов горохового белка. Независимо от итоговой формы семена гороха перед переработкой подвергаются предварительной подготовке, включающей очистку, сушку, сортировку, шелушение и измельчение.

Полученные из анализа открытых источников научной литературы данные позволили выделить следующие традиционные методы, применяемые для экстрагирования белка гороха (табл. 2): экстрагирование методом сухого фракционирования; влажная экстракция (щелочная); солевая экстракция (мицеллизация) [11–13].

Следует отметить, что несмотря на распространенность описанных традиционных методов экстрагирования и наличие их реализации уже не в лабораторных условиях, а производственном исполнении, экстремальные условия экстракции, такие как высокая температура или высокая щелочность, могут влиять на термические, конформационные и функционально-технологические свойства белковых фракций, снижая их пищевую

Таблица 2

Методы экстракции

Название метода	Суть метода	Основные этапы	Выход белка, %
Сухое фракционирование/ воздушная классификация	Принцип сухого фракционирования заключается в разделении муки на частицы различного размера и химического состава после помола. Сухая экстракция состоит из измельчения с последующим фракционированием частиц муки на такие составляющие, как крахмал, клетчатка или белок. Воздушная классификация гороховой муки осуществляется в спиральном воздушном потоке разделяя измельченный продукт на легкую мелкую фракцию, содержащую концентрат белка и тяжелую грубую фракцию – крахмал	Измельчение, в т. ч. валиковое, молотковое, каменное, штифтовое и струйное, и последующее воздушное фракционирование. После измельчения некоторая часть крахмала остается прикрепленной к белковой матрице, а некоторые белковые соединения все еще соединены с крахмальными гранулами. Разделение белка и крахмала можно улучшить, повторяя методы воздушной классификации и измельчения [14]	50–77
Щелочная экстракция/ изоэлектрическое осаждение	Наиболее часто используемый традиционный метод получения изолятов белков гороха (высококонцентрированных белковых фракций), основанный на использовании высокой растворимости белков в щелочных условиях. В то же время минимальная растворимость проявляется в их изоэлектрической точке (pI) в районе pH 4–5 и использует те же свойства растворимости для вицилина и легумина. Щелочеподобные NaOH и KOH обычно используются для поддержания основного pH, разрывая дисульфидные связи в белке, что увеличивает извлечение белка [14] и его выход	Обезжиренная мука растворяется в воде в процессе щелочной экстракции / изоэлектрического осаждения. Затем pH доводят до щелочного уровня с помощью NaOH или KOH и оставляют на 30–180 минут для максимизации растворимости белка. Затем температуру повышают до 50–60 °C, и смесь разделяют центрифугированием, затем собирают надосадочную жидкость и доводят до изоэлектрического значения pH. Осажденный белок собирают центрифугированием, затем промывают, нейтрализуют и сушат лиофилизацией	62–80
Солевая экстракция/ мицеллизация	Заключается в явлениях всаливания и высаливания белков с последующим процессом обессоливания, который снижает ионную силу белковой среды. Метод мицеллизации вызывает осаждение белка путем добавления к воде холодной воды в соотношении от 1:3 до 1:10 (по объему) высокосолевого белкового экстракта. Разбавление белкового раствора заставляет солиобилизованные белки регулировать низкую ионную силу посредством серии реакций диссоциации [14] с образованием низкомолекулярных агрегатов	Гороховую муку перемешивают в растворе соли в течение 10–60 мин с заданной ионной силой в соотношении 1:10 (по массе / объему). Нерастворимые вещества удаляют отстаиванием, сливом, просеиванием и центрифугированием. При достижении критической концентрации белка белковые агрегаты объединяются в виды со сравнительно низкой молекулярной массой, называемые мицеллами, осаждаемые из растворов. Чтобы максимизировать образование мицелл, разбавленный раствор отстаивают. Затем осажденный белок можно извлечь центрифугированием, промыванием и распылительной сушкой	68–75

ценность и разрушая их биологически активные соединения. Поэтому современные исследования сосредоточены на поиске нетермических экологически чистых технологиях, базирующихся на экоинновационных подходах. Такие инновационные методы не только нетоксичны для природы и человека, но и могут повысить выход белка, улучшить питательные и функционально-технологические свойства выделяемого белка, а также раскрыть его потенциал в качестве источника биоактивных пептидов. В качестве прорывных технологий экстрагирования, применяемых при работе с бобовым сырьем, активно изучаются возможности следующих методов [15]:

- субкритическая водная экстракция (SWE) – это метод, основанный на использовании горячей воды в диапазоне от нормальной температуры кипения воды (100 °С) до критической температуры воды (374 °С) при использовании высокого давления для поддержания воды в жидком состоянии при этих температурах (обычно 220–230 бар);

- ферментативно-ассистированная экстракция (EAE) – это «зеленая» технология, основанная, во-первых, на действии ферментов, разрушающих основные компоненты клеточной стенки, таких как целлюлоза, гемицеллюлоза и/или пектины, что приводит к разрушению стенки и высвобождению клеточных белков;

- микроволновая экстракция (MAE) – это новый метод разрушения клеток, в котором используются электромагнитные волны с частотой от 300 МГц до 300 ГГц;

- методы, основанные на применении сверхкритической экстракции диоксидом углерода (SC-CO₂) – это технология разделения, в которой для экстракции используется сверхкритический жидкий растворитель. В настоящее время доступно несколько технологий SC-CO₂ для формирования частиц, капсулирования и сушки широкого спектра материалов.

В отношении фракционирования можно отметить следующее: в отдельных источниках фракционирование рассматривают как вариант, совмещенный с процессом экстрагирования белка, а в других его выделяют в отдельный метод переработки. В этом случае разделение высокомолекулярных и низкомолекулярных белков осуществляется через систему фильтров.

Вопрос фракционирования имеет значительный интерес для дальнейшего создания пищевых продуктов, поскольку именно от того, какая фракция будет преимущественно присутствовать в выделенном продукте переработки и разделения горохового белка, будет зависеть и его функционально-технологические характеристики, и возможность целевого использования. Поэтому целесообразно разделять различные фракции растительного белка для конкретного применения или с целью получить белковые ингредиенты, обогащенные отдельными фракциями, которые потом в различных пропорциях использовать для достижения целевых функционально-технологических задач.

Фракционирование растительных белков осуществляется на основе молекулярных характеристик его отдельных фракций. С точки зрения своего состава белки семян гороха состоят из основных глобулинов (65–80 %), альбуминов, проламинов и глютелинов. Глобулярные белки состоят из полипептидных цепей, которые сворачиваются в плотно упакованную форму благодаря гидрофобным эффектам, водородным связям, электростатическим силам, силам Ван-дер-Ваальса и дисульфидным связям [16]. Структуры проламинов и глютелинов сходны по соотношению пролина и глутамина и аминокислотным последовательностям; но они различаются по молярной массе, а также внутри- и межмолекулярной структуре [16]. Альбумины и глобулины преимущественно присутствуют во всех зернобобовых (>50 %), при этом в гороховом белке на долю глобулинов приходится 65–80 % [17]. В свою очередь глобулины состоят из трех разных белков: легумина, вицилина и конвицилина. Глобулярные белки действуют как хорошие эмульгаторы и пенообразователи благодаря неполярным участкам на их поверхности, которые способствуют адсорбции на границах раздела масло-вода или воздух-вода. Глобулярные белки также можно использовать в качестве гелеобразующих агентов, поскольку при нагревании они разворачиваются, открывая неполярные и сульфгидрильные группы для окружающей водной фазы, вызывая агрегацию посредством образования гидрофобных и дисульфидных связей.

Альбумин представляет собой водорастворимый белок, на долю которого приходится 18–25 % от общего белка в семенах гороха. В семенах гороха различают два альбумина с

небольшой молекулярной массой (6 кДа), который содержит 53 аминокислоты, и второй с более низкой молекулярной массой (4кДа), содержащей 37 аминокислот [18]. Альбумины гороха имеют более низкие общие эмульгирующие свойства, чем глобулины, из-за низкой молекулярной гибкости и гидрофобности. Соотношение глобулина и альбумина в продуктах переработки горохового белка варьируется в зависимости от генетических вариантов и условий обработки, которые далее влияют на их физико-химические и функционально-технологические свойства.

Проламины представлены в семенах гороха в небольшом количестве (4–5 %), растворимы только в растворах крепкого спирта (70–80 %), легких кислот и щелочей, при нагревании проламин не коагулирует, а гидролизуется до пролина и аммиака. Глютелин, нерастворимый белок, обнаруженный в незначительном количестве в семенах гороха (3–4 %), является основным компонентом белкового композита, такого как глютен, растворим в разбавленных кислотах или основаниях, и богат гидрофобными аминокислота-

ми, такими как фенилаланин, валин, тирозин и пролин [14].

Альбумины, глобулины, глютелины и проламины могут образовывать изотропные (например, йогуртоподобные) или анизотропные (например, волокнистые структуры) гели, но в большинстве случаев для этого они требуют физических, химических или ферментативных модификаций.

На следующем этапе исследования проведен анализ технических решений в области модификации растительного белка.

Под модификацией нами понимается процесс трансформации молекулярной структуры или химических групп белка с целью улучшения функциональных свойств конкретными методами, что позволяет обеспечить способность растительных белков выступать в качестве многофункциональных компонентов пищевых систем. В общем виде применяемые для модификации методы делятся на химические, физические и биологические [14, 19]. Более подробное описание сути методов и достигаемых в ходе модификации эффектов приведены в табл. 3.

Таблица 3
Методы модификации для улучшения функциональных свойств горохового белка

Название метода	Суть метода	Основные изменения функциональных характеристик
Физические методы		
Термическая обработка	Термическая обработка белков гороха для осуществления модификации предполагает воздействие от 30 минут и температуре от при 95 °С. Высокотемпературная обработка вызывает необратимые изменения в структурах белков, в том числе гидрофобных, дисульфидных и электростатических связей, что приводит к снижению растворимости из-за агрегации и осаждения белков	Увеличивается способность белка к эмульгированию, но снижает пенообразующие свойства
Использование высокого гидростатического давления/ High hydrostatic pressure (ННР)/ High-pressure processing (НРР)	Обработка высоким давлением – это совокупность методов нетермической обработки, при котором пищевые продукты подвергаются воздействию высокого гидростатического давления (100–800 МПа) и выдерживаются в течение определенного времени (3–5 минут) [16]. Процессы ННР и НРР помогают улучшить гидрофобность белка, при снижении растворимости из-за его способности обнажать скрытые сульфгидрильные группы после разворачивания белка, денатурации с последующей агрегацией и коагуляцией, что и улучшает его функционально-технологические свойства	Давление выше 300 МПа вызывает необратимую денатурацию и агрегацию и может привести к превращению одной вторичной структуры в другую. Изменения структуры белка, изменяет такие его функционально-технологические свойства, как: растворимость, вододерживающая способность, склонность к эмульгированию и пенообразованию, а также образованию гелей

Продолжение табл. 3

Название метода	Суть метода	Основные изменения функциональных характеристик
Гомогенизация под высоким давлением / High-pressure homogenization (НПН)	НПН – это технология, которая обеспечивает однородное распределение частиц по размерам, взвешенных в жидкости, путем пропускания через узкое отверстие или клапан. Механические силы НПН приводят к кавитации и фрагментации макромолекул за счет уменьшения размера частиц растительных белков [16]	Увеличивается растворимость белка, а также повышаются эмульгирующие и пенообразующие свойства из-за уменьшения размера частиц
Экструзия	Экструзия – это процесс, при котором материал при различных условиях смешивания, нагрева и сдвига пропускается через матрицу, предназначенную для формирования или сушки ингредиентов. Процесс осуществляется путем сочетания механического сдвига, давления и тепла, при котором ингредиенты последовательно смешиваются, а высокие механические напряжения создаются большим вращающимся шнеком при высокой температуре (90–200 °С) и давлении (1,5–30,0 МПа)	Экструзия заставляет белковые молекулы разворачиваться, денатурировать и перестраиваться, что не только улучшает их функционально-технологические свойства, но и формирует текстуру, поэтому широко используется для текстурирования растительных белков
Ультразвуковая обработка/ Sonication/ Ultrasound processing	Ультразвуковая обработка — это нетермическая зеленая технология, которая может изменять конформацию и структуру белка за счет разрушения нековалентных связей. В этом процессе применяется звуковая энергия чрезвычайно высоких частот (>20 кГц) для разрушения крупных частиц в растворе посредством физической вибрации с использованием либо ультразвукового зонда [16] (например, ультразвукового аппарата), либо ультразвуковой ванны	В процессе разрушается вторичная структура белка, а также частично денатурирует третичная и четвертичная структуру белка без каких-либо изменений первичной структуры, что эффективно улучшает растворимость, пенообразующие свойства и эмульгирующую активность
Обработка холодной атмосферной плазмой/ Cold atmospheric plasma processing (CAPP)	Обработка холодной атмосферной плазмой основана на применении холодной плазмы, четвертого состояния вещества, и осуществляется путем слияния источников тепловой, механической, ядерной и электрической энергии в широком диапазоне температур и давлений, вызывает разрыв химических связей или инициирование химических изменений, используется для улучшения функциональных свойств и уменьшения размера молекул и агрегатов растительных белков	Улучшает растворимость, эмульгирующую и водоудерживающую способности, улучшает гелеобразующие свойства горохового белка, позволяя ему образовывать гели при нагревании ниже 90 °С.
Химические методы		
Гликирование	Гликирование — представляет собой ферментативную реакцию гликозилирования, приводящую к изменению функциональных возможностей белка и не требующую экзогенных химических веществ. Гликирование может быть достигнуто химически посредством реакций Майяра или может быть получено с помощью ферментов сшивания, таких как трансглутаминаза или лакказы. Гликирование растительных белков может осуществляться методами нагревания в сухом или влажном состоянии	Связь между структурой гликированных белков гороха и их функциональностью четко не установлена, но есть исследования, подтверждающие увеличение пенообразующей способности и стабильности пены

Окончание табл. 3

Название метода	Суть метода	Основные изменения функциональных характеристик
Ацилирование/ Сукцинирование	Ацилирование – это добавление ацильной группы к белку с помощью ацилангидридов и галогенидов. В случае ацилирования, добавляется уксусный ангидрид. Сукцинирование проводят добавлением янтарного ангидрида; при этом сукцинильные группы встраиваются в белок. В результате этой реакции в остатках лизина происходит смена заряда с положительного на отрицательный	При ацилировании обнажаются гидрофильные группы, и, следовательно, улучшая растворимость. Влияние сукцинирования на вторичную структуру помогает улучшить растворимость, пенообразующие свойства, стабильность эмульсии и водоудерживающую способность горохового белка
Деамидирование	Деамидирование – это процесс превращения амидных групп остатков глутамина и аспарагина в карбоксильные группы за счет увеличения отрицательного заряда белка. Поскольку при деамидировании процесс можно проводить в мягких условиях и без использования каких-либо дополнительных молекул, то этот метод модификации белка в пищевых системах считается безопасным. Деаминирование можно проводить различными методами, такими как обработка щелочью, кислотой, ферментативной обработкой (протеин-глутаминаза) и обработкой катионообменной смолой	Улучшает растворимость и функционально-технологические свойства горохового белка, уменьшает неприятный бобовый вкус, горечь и комковатость
Биологические методы		
Ферментация	Для ферментации растительных белков используются различные закваски, такие как молочнокислые бактерии, дрожжи, плесени и штаммы палочек, среди которых наиболее распространены молочнокислые бактерии	Ферментация помогает улучшить растворимость белка, водо- и жирудерживающую способность, а также формовочные и питательные свойства и усвояемость горохового белка
Ферментативный гидролиз	Ферментативный гидролиз осуществляется путем каталитической реакции между протеолитическими ферментами и белковыми субстратами, которая приводит к разрыву пептидных связей и расщеплению субстрата на короткоцепочечные пептиды и аминокислоты с более низкой молекулярной массой	Поскольку снижается молекулярная масса, увеличивается количество ионизируемых групп и обнажаются гидрофобные группы, скрытые в ядре белка, потенциально улучшается растворимость, гидрофобность, эмульгирующие и пенообразующие свойства белка
Ферментативное сшивание	Ферментативное сшивание достигается за счет образования ковалентных связей с помощью трансглутаминазы, катализируя реакцию ацильного переноса между γ -карбоксамидной группой связанного с белком глутамина и ϵ -аминогруппой лизина	В общем случае добавление трансглутаминазы способствует сшиванию белковых молекул и повышению способности к гелеобразованию. Обработка микробной трансглутаминазой (MTG) фракции альбумина и глобулина горохового белка дала разные результаты, например, невозможность гелеобразования фракции альбумина

В отношении методов модификации также для придания растительным белкам лучших функциональных характеристик существует ещё целый ряд химических модификаций, объединенных термином – дериватизация, включающая реакции с химическими агентами и модификацию путем изменения рН и объединяющую такие процессы, как: ацилирование, фосфорилирование, этерификацию и дезаминирование. Однако применение этих методов в пищевом секторе серьезно ограничено из-за использования многих опасных химикатов и, как следствие, неизвестной достоверности потребления модифицированных белков или их побочных продуктов, поэтому нами был выделен для детального рассмотрения только метод, имеющий практическое применение – ацилирование/сукцинилирование.

Выводы

Полученные из анализа открытых источников научной литературы данные в отноше-

нии имеющихся подходов к технологиям экстрагирования, фракционирования и модификации белковых концентратов и изолятов, полученных на основе гороха, позволяют говорить, что их функционально-технологические свойства в значительной степени зависят от методов, используемых для их производства, их изначальных физико-химических свойств (например, аминокислотного профиля, структуры, конформации, заряда, гидрофобности, размера и др.) и уровня происходящих изменений белковой структуры в целом и отдельных фракций в частности. Величина влияния различных методов обработки на функционально-технологические свойства белков очень затрудняет сравнение характеристик бобовых белков в разных исследованиях и требует дополнительного исследования функционально-технологических свойств применительно к отечественным сортам гороха, а также полученных из него гороховой муки, концентратов и изолятов.

Список литературы

1. Daniel Lopez de Romaña, Alison Greig, Andrew Thompson, Mandana Arabi. Successful delivery of nutrition programs and the sustainable development goals // *Current Opinion in Biotechnology*. 2021. Vol. 70. P. 97–107. ISSN 0958-1669. URL: <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2021.03.004>
2. Munteanu Camelia, Schwartz Betty. The relationship between nutrition and the immune system // *Frontiers in Nutrition*. 2022. 9. DOI: 10.3389/fnut.2022.1082500. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnut.2022.1082500>.
3. Wu G. Dietary protein intake and human health // *Food Funct*. 2016 Mar; 7(3):1251-65. DOI: 10.1039/c5fo01530h. PMID: 26797090.
4. Экологические технологии для эффективного использования продовольственных ресурсов в технологии пищевых систем. Часть 2: Технология бифункциональных пищевых систем на основе эмульсий Пикеринга / И.Ю. Потороко, Н.В. Науменко, А.М.Я. Кади, А.В. Паймулина // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Пищевые и биотехнологии*. 2022. Т. 10, № 3. С. 55–63. DOI: 10.14529/food220306.
5. The problems and prospects of developing food products from high-protein raw materials / E. Bychkova, L. Rozhdestvenskaya, E. Podgorbunskikh, P. Kudachyova // *Food Bioscience*. 2023. 103286. ISSN 2212-4292. DOI: 10.1016/j.fbio.2023.103286. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212429223009379>
6. Кандроков Р.Х., Бекшоков К.С. Влияние соотношения зерновой помольной смеси на крупнообразующую способность и выход тритикалево-ржаной муки // *Индустрия питания*. 2022. Т. 7, № 4. С. 50–58. DOI: 10.29141/2500-1922-2022-7-4-6.
7. Зерно бобовых растений. Общая характеристика и применение в технологии пищевых концентратов / А.А. Королев, С.А. Урубков, И.С. Коптяева, Л.Я. Корнева // *Ползуновский вестник*. 2020. № 2. С. 35–39. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2020.02.007.
8. Зернобобовые культуры в структуре функционального питания (фасоль зерновая и овощная, горох овощной, нут) / Н.Г. Казыдуб, С.П. Кузьмина, О.А. Коцюбинская и др. // *Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада*. 2019. № 133. С. 157–167. DOI: 10.36305/0513-1634-2019-133-157-167. EDN: TJAVKA

9. Перспективы применения зернобобовых в инновационных технологиях функциональных продуктов питания / Н.С. Родионова, И.П. Щетилина, К.Г. Короткова и др. // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2020. Т. 82, № 3 (85). С. 153–163. DOI: 10.20914/2310-1202-2020-3-153-163
10. Pea protein isolates: Structure, extraction, and functionality / Lam, Angie Che Yan, Aslı Can Karaça, Robert T. Tyler and Michael T. Nickerson // Food Reviews International. 2018. 34. P. 126–147. DOI: 10.1080/87559129.2016.1242135
11. Advances in the plant protein extraction: Mechanism and recommendations / M. Kumar, M. Tomar, J. Potkule et al. // Food Hydrocoll. 2021.115.106595. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2021.106595
12. Caren Tanger, Johannes Mertens, Ulrich Kulozik. Influence of extraction method on the aggregation of pea protein during thermo-mechanical treatment // Food Hydrocolloids. 2022. Vol. 127. 107514. ISSN 0268-005X. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2022.107514. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0268005X22000340>
13. Emkani M., Oliete B., Saurel R. Pea Protein Extraction Assisted by Lactic Fermentation: Impact on Protein Profile and Thermal Properties // Foods. 2021. 10. 549. URL: <https://doi.org/10.3390/foods10030549>
14. The Current Situation of Pea Protein and Its Application in the Food Industry / P. Shanthakumar, J. Klepacka, A. Bains et al. // Molecules. 2022, 27, 5354. URL: <https://doi.org/10.3390/molecules27165354>
15. Franca-Oliveira Giselle, Tiziana Fornari and Blanca Hernández-Ledesma. A Review on the Extraction and Processing of Natural Source-Derived Proteins through Eco-Innovative Approaches // Processes. 2021. 9(9): 1626. URL: <https://doi.org/10.3390/pr9091626>
16. Plant Proteins for Future Foods: A Roadmap / S.Y.J. Sim, A. Srv, J.H. Chiang, C.J. Henry // Foods. 2021. Aug 23. 10(8). 1967. DOI: 10.3390/foods10081967. PMID: 34441744; PMCID: PMC8391319
17. Boye J., Zare F., Pletch A. Pulse proteins: Processing, characterization, functional properties and applications in food and feed // Food Res. Int. 2010. 43. P. 414–431. DOI: 10.1016/j.foodres.2009.09.003
18. A reference genome for pea provides insight into legume genome evolution / J. Kreplak, M.A. Madoui, P. Cápál et al. // Nat. Genet. 2019. 51. P. 1411–1422. DOI: 10.1038/s41588-019-0480-1
19. The health benefits, functional properties, modifications, and applications of pea (*Pisum sativum* L.) protein: Current status, challenges, and perspectives / J. Ge, C.X. Sun, H. Corke et al. // Compr. Rev. Food Sci. Food Saf. 2020. 19. P. 1835–1876. DOI: 10.1111/1541-4337.12573

References

1. Daniel Lopez de Romaña, Alison Greig, Andrew Thompson, Mandana Arabi. Successful delivery of nutrition programs and the sustainable development goals. *Current Opinion in Biotechnology*. 2021; 70: 97–107. ISSN 0958-1669. URL: <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2021.03.004>
2. Munteanu Camelia, Schwartz Betty. The relationship between nutrition and the immune system. *Frontiers in Nutrition*. 2022; 9. DOI: 10.3389/fnut.2022.1082500. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnut.2022.1082500>
3. Wu G. Dietary protein intake and human health. *Food Funct*. 2016 Mar; 7(3):1251-65. DOI: 10.1039/c5fo01530h. PMID: 26797090.
4. Potoroko I.Yu., Naumenko N.V., Kadi A.M.Y., Paymulina A.V. Ecotechnologies for efficient use of food resources in food system technology. Part 2: Bifunctional food systems technology based on Pickering emulsions. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnology*, 2022, vol. 10, no. 3, pp. 55–63. (In Russ.) DOI: 10.14529/food220306. EDN: QLBUZW.
5. Bychkova E., Rozhdestvenskaja L., Podgorbunskih E., Kudacheva P. The problems and prospects of developing food products from high-protein raw materials. *Food Bioscience*, 2023, 103286. ISSN 2212-4292. DOI: 10.1016/j.fbio.2023.103286. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212429223009379>

6. Kandrov R.H., Bekshokov K.S. The effect of the ratio of grain grinding mixture on the grain-forming ability and yield of triticale-rye flour. *Industrija pitanija* [Food Industry], 2022, 7, 4: 50–58. (In Russ.) DOI: 10.29141/2500-1922-2022-7-4-6. EDN: MGIQVP.

7. Koroljov A.A., Urubkov S.A., Koptjaeva I.S., Korneva L.Ja. Zerno bobovyh rastenij. General characteristics and application in the technology of food concentrates. *Polzunovskij vestnik* [Polzunovsky Bulletin], 2020, 2, pp. 35–39. (In Russ.) DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2020.02.007.

8. Kazydub N.G., Kuz'mina S.P., Kotsyubinskaya O.A., Bondarenko N.A., Ufimtseva S.V. Grain legumes (haricot, bean, pea and chickpea) in the structure of functional nutrition. *Bull. of the State Nikita Botan. Gard.*, 2019, no. 133, pp. 157–167. (In Russ.) DOI: 10.36305/0513-1634-2019-133-157-167. EDN: TJABKA

9. Rodionova N.S., Shchetilina I.P., Korotkova K.G., Cholin V.A., Cherkasova N.S., Torosyan A.O. Prospects for the use of pulses in innovative technologies for functional food products. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 2020, vol. 82(3), pp. 153–163. (In Russ.) DOI: 10.20914/2310-1202-2020-3-153-163

10. Lam, Angie Che Yan, Aslı Can Karaça, Robert T. Tyler and Michael T. Nickerson. “Pea protein isolates: Structure, extraction, and functionality”. *Food Reviews International*, 2018, 34, 126–147. DOI: 10.1080/87559129.2016.1242135

11. Kumar M., Tomar M., Potkule J., Verma R., Punia S., Mahapatra A., Belwal T., Dahuja A., Joshi S., Berwal M.K., et al. Advances in the plant protein extraction: Mechanism and recommendations. *Food Hydrocoll.* 2021;115:106595. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2021.106595

12. Caren Tanger, Johannes Mertens, Ulrich Kulozik. Influence of extraction method on the aggregation of pea protein during thermo-mechanical treatment. *Food Hydrocolloids*, 2022, 12, 107514. ISSN 0268-005X. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2022.107514. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0268005X22000340>

13. Emkani M., Oliete B., Saurel R. Pea Protein Extraction Assisted by Lactic Fermentation: Impact on Protein Profile and Thermal Properties. *Foods*, 2021, 10: 549. URL: <https://doi.org/10.3390/foods10030549>

14. Shanthakumar, P., Klepacka, J., Bains, A., Chawla, P., Dhull, S.B., Najda, A. The Current Situation of Pea Protein and Its Application in the Food Industry. *Molecules*, 2022, 27, 5354. URL: <https://doi.org/10.3390/molecules27165354>

15. Franca-Oliveira Giselle, Tiziana Fornari and Blanca Hernández-Ledesma. A Review on the Extraction and Processing of Natural Source-Derived Proteins through Eco-Innovative Approaches. *Processes*, 2021, 9(9): 1626. URL: <https://doi.org/10.3390/pr9091626>

16. Sim S.Y.J., Srivastava A., Chiang J.H., Henry C.J. Plant Proteins for Future Foods: A Roadmap. *Foods*, 2021, Aug 23;10(8):1967. DOI: 10.3390/foods10081967, PMID: 34441744; PMCID: PMC8391319

17. Boye J., Zare F., Pletch A. Pulse proteins: Processing, characterization, functional properties and applications in food and feed. *Food Res. Int.*, 2010;43:414–431. DOI: 10.1016/j.foodres.2009.09.003

18. Kreplak J., Madoui M.A., Cápál P., Novák P., Labadie K., Aubert G., Bayer P.E., Gali K.K., Syme R.A., Main D., et al. A reference genome for pea provides insight into legume genome evolution. *Nat. Genet.*, 2019, 51: 1411–1422. DOI: 10.1038/s41588-019-0480-1

19. Ge J., Sun C.X., Corke H., Gul K., Gan R.Y., Fang Y. The health benefits, functional properties, modifications, and applications of pea (*Pisum sativum* L.) protein: Current status, challenges, and perspectives. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, 2020, 19: 1835–1876. DOI: 10.1111/1541-4337.12573

Информация об авторах

Рождественская Лада Николаевна, к.э.н, доцент, зав. каф. технологии и организации пищевых производств, Новосибирский государственный технический университет; ведущий научный сотрудник отдела гигиенических исследований с лабораторией физических факторов, Новосибирский научно-исследовательский институт гигиены Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Новосибирск, Россия, rozhdestvenskaya@corp.nstu.ru

Чугунова Ольга Викторовна, доктор технических наук, профессор кафедры технологии питания, Уральский государственный экономический университет, Екатеринбург, Россия, chugunova@usue.ru

Information about the authors

Lada N. Rozhdestvenskaya, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Head of the Food Production Technology and Organization Department, Novosibirsk State Technical University; Leading Researcher, Novosibirsk Research Institute of Hygiene of the Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Welfare, Novosibirsk, Russia, rozhdestvenskaya@corp.nstu.ru

Olga V. Chugunova, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Food Technology, Ural State University of Economics, Yekaterinburg, Russia, chugunova@usue.ru

Статья поступила в редакцию 08.10.2023

The article was submitted 08.10.2023