

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-324-335>

Поступила 02.04.2024

Поступила после рецензирования 09.07.2024

Принята в печать 15.07.2024

© Колпакова В. В., Бызов В. А., 2024



<https://www.fsjour.com/jour>

Обзорная статья

Open access

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И МОЛЕКУЛЯРНО-СТРУКТУРНАЯ МОДИФИКАЦИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ БЕЛКОВ. ОБЗОР

Колпакова В. В.*, Бызов В. А.

Всероссийский научно-исследовательский институт крахмала и переработки крахмалосодержащего сырья — филиал Федерального исследовательского центра картофеля имени А. Г. Лорха, Красково, Московская область, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

бобовые, зерновые,
масличные,
полипептиды,
физико-химические
показатели,
функциональные
свойства,
биологические
свойства,
взаимосвязь,
регулирование

Белковые препараты из растительного сырья широко применяются в пищевой промышленности в качестве улучшителей, заменителей или обогащителей продуктов. Однако их функциональные свойства, как правило, менее выражены, чем у белков животного происхождения. Цель обзора заключалась в анализе и обобщении результатов исследований, посвященных изучению и характеристике основных функциональных свойств растительных белков (гидратация, растворимость, водо-, жиросвязывающая и гелеобразующая способности, стабильность эмульсий, пен, реологические свойства, текстурирование) и их модификации. Объектом исследования служили научные публикации, большинство из которых опубликовано в 2017–2024 годах. Проводилась характеристика функциональных свойств белков, выявлялась их зависимость от природы и сорта культуры, от методов выделения, от технологических факторов обработки и от способов модификации. Поиск и отбор статей осуществлялся в библиографических базах eLIBRARY.RU, RSCI, Google Scholar, Scopus, Web of Science, Elsevier, PubMed. Анализ данных выполнен с их систематизацией, обобщением, промежуточными выводами и общим заключением. Особое внимание уделено химическим, физическим, физико-химическим и ферментативным способам модификаций свойств белков, их достоинствам, недостаткам, а также взаимосвязи структурных и физико-химических особенностей белков с их функциональными свойствами. Выявлены основные закономерности влияния способов модификации на вторичную, третичную структуру белков, на поверхностную гидрофобность, на соотношение из фракций, на агрегацию, на денатурацию и на биологическую активность, полученные современными методами исследования (ИК-спектроскопия, флуоресцентная микроскопия, SDS–ПААГ, круговой дихроизм, спектрофотометрия и т. д.). Сделан вывод о том, что в связи с расширением производства белковых препаратов из альтернативного сырья (горох, нут, подсолнечник, фасоль, рис и т. д.) необходимы дальнейшие исследования, направленные на изучение взаимосвязи молекулярно-структурных особенностей белков с показателями функциональности и с закономерностями их поведения в пищевых системах. На основе выявленных и вновь получаемых теоретических сведений возможна целенаправленная модификация и регуляция свойств белковых ингредиентов для производства пищевых продуктов высокого качества.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследования выполнены в рамках задания FGGM-2022-00006 ВНИИК — филиал ФГБНУ «ФИЦ картофеля имени А. Г. Лорха» «Разработать научно-практические основы технологии производства новых углеводных и белковых компонентов их крахмалосодержащего сырья на основе системного анализа их состава и свойств для глубокой переработки картофеля, зернового и зернобобового сырья».

Received 02.04.2024

Accepted in revised 09.07.2024

Accepted for publication 15.07.2024

© Kolpakova V. V., Byzov V. A., 2024

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Review article

Open access

FUNCTIONAL CHARACTERISTICS AND MOLECULAR STRUCTURAL MODIFICATION OF PLANT PROTEINS. REVIEW

Valentina V. Kolpakova*, Vasily A. Byzov

All-Russian Research Institute of Starch and Starch — containing Raw Materials Processing — Branch of Russian Potato Research Centre, Kraskovo, Moscow region, Russia

KEY WORDS:

hydrocolloids,
visco-elastic
characteristics,
structure, air phase,
ice crystals

ABSTRACT

Protein preparations from plant raw materials are widely used in the food industry as improvers, replacers or enrichers for products. However, their functional properties, as a rule, are less pronounced than those of proteins of animal origin. The aim of the review is to analyze and summarize the results of investigations dedicated to studying and characterizing the main functional properties of plant proteins (hydration, solubility, water binding capacity, fat binding capacity and gel-forming capacity, stability of emulsions, foams, rheological properties, texturization) and their modification. The objects of the research were scientific publications, most of which were published in 2017–2024. Functional properties of proteins were characterized; their dependence on the nature and variety of crop, methods of extraction, technological factors of processing and methods of modification was revealed. The search and selection of papers were carried out in the bibliographic databases eLIBRARY.RU, RSCI, Google Scholar, Scopus, Web of Science, Elsevier, and PubMed. Data analysis was performed with their systematization, generalization, intermediate conclusions and general conclusion. The special attention was paid to chemical, physical, physico-chemical and enzymatic methods for modification of protein properties, their advantages and disadvantages, as well as the interrelation of structural and physico-chemical features of proteins with their functional properties. The main regularities were revealed for an effect of modification methods on the secondary and tertiary structures of proteins, surface hydrophobicity, the ratio from fractions, aggregation, denaturation and biological activity obtained by the modern methods of investigations (IR-spectroscopy, fluorescent microscopy, SDS-PAGE, circular dichroism, spectrophotometry and so on). It has been concluded that it is necessary to carry out further investigations aimed to studying interrelation of molecular

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Колпакова, В. В., Бызов, В. А. (2024). Функциональные характеристики и молекулярно-структурная модификация растительных белков. Обзор. *Пищевые системы*, 7(3), 324–335. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-324-335>

FOR CITATION: Kolpakova, V. V., Byzov, V. A. (2024). Functional characteristics and molecular structural modification of plant proteins. Review. *Food Systems*, 7(3), 324–335. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2024-7-3-324-335>

structural features of proteins with indicators of functionality and regularities of their behavior in food systems due to an increase in the production of protein preparations from alternative raw materials (pea, chickpea, sunflower, kidney bean, rice and others). Based on the revealed and newly obtained theoretical information, the targeted modification and regulation of properties of protein ingredients for production of high-quality foods are possible.

FUNDING: The research was carried out within the framework of assignment FGGM-2022–00006 VNIIC — a branch of the Federal State Budgetary Institution "Financial Research Center for Potatoes named after A. G. Lorkha" "To develop scientific and practical foundations for the production technology of new carbohydrate and protein components of their starch-containing raw materials based on a systematic analysis of their composition and properties for deep processing of potatoes, grain and leguminous raw materials".

1. Введение

Белки — один из важнейших и обязательных компонентов здорового и полноценного питания. Их недостаток может привести к негативным последствиям для здоровья, таким как снижение иммунитета, развитие сахарного диабета, сердечно-сосудистых заболеваний, нарушение функции почек, возникновение аллергических реакций, задержка роста и т. д. [1]. Пищевой растительный белок способен повышать биологическую ценность продуктов питания за счет обязательных аминокислот, заменять дорогостоящие и дефицитные животные белковые продукты с одновременным улучшением технологических показателей качества изделий. Использование растительных белков в производстве продуктов питания возможно только благодаря их уникальным функциональным свойствам, особенностям и способности взаимодействовать с различными факторами пищевых систем [2]. Поэтому сведения относительно физико-химических характеристик белков, способов модификаций в соответствии с особенностями их структуры необходимы для обеспечения внешнего вида и консистенции пищевых продуктов при разработке конкурентоспособных рецептур для их эффективного сбыта.

Цель обзора — анализ и обобщение исследований, направленных на изучение функциональных свойств пищевых белковых препаратов из различного вида растительного сырья. Также в работе представлена характеристика этих препаратов, включая описание взаимосвязи их свойств с физико-химическими и структурными особенностями белков, а также с различными способами модификаций.

Задачи обзора — осуществить сбор литературных данных в соответствии с целью обзора, отобрать цитируемые и достоверные источники; охарактеризовать наиболее значимые функциональные свойства белковых препаратов для пищевых систем, их зависимость от структуры белков, от технологических факторов и от способов модификаций, а также обобщить результаты по перспективам использования для регулирования и улучшения значений функциональных свойств.

2. Материалы и методы

В качестве материала для исследования использованы научные публикации, отбираемые по следующим критериям: год издания (2019–2024), география изданий, цитируемость, достоверность результатов относительно характеристик функциональных свойств растительных белковых препаратов, влияния на них различных факторов и модификаций.

Поиск и отбор статей осуществлялся в библиографических базах eLIBRARY.RU, RSCI, Google Scholar, Scopus, Web of Science, Elsevier, PubMed, после чего был выполнен анализ полученных результатов с их систематизацией, обобщением, промежуточными выводами и общим заключением.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Виды белковых препаратов

В зависимости от содержания белка белковые препараты подразделяются на три группы: мука, концентраты, изоляты. С использованием этих групп организовано производство и маркетинг текстурированных, модифицированных и специализированных белковых препаратов [2]. Мука и крупа производятся путем измельчения семян до определенного размера частиц с последующим их просеиванием на мельничном оборудовании (молотковые дробилки, вихревые мельницы, классификаторы). Гранулометрический состав контролируется воздушной сепарацией и определенными номерами сит. В муке (крупке) содержится 40–50% белка ($N \times 6,25$) от массы продукта. Все виды отличаются по содержанию жира (обезжиренная, необезжиренная), по размеру частиц, по степени тепловой обработки, по коэффициентам растворимости азота (КРА) и по диспергируемости белка (КДБ) [3]. Продукты, например, из сои отличаются по активности липоксигеназы, уреазы, ингибиторов протеаз. Тостированная мука представляет собой продукт, обработанный паром при

небольшом давлении, а иногда и, нагреванием. Экструдированная мука является продуктом, подвергнутым сдвиговым деформациям в экструдерах разной конформации с последующей варкой и охлаждением. Обезжиренные белковые продукты вырабатываются из семян путем отделения от них оболочки с последующей обработкой гексаном [3].

Белковые концентраты содержат 60–75% белка на сухое вещество ($N \times 6,5$) [2]. Отличительной особенностью состава является присутствие углеводов, например, полисахаридов или олигосахаридов в количестве не более 8%. Технологии концентратов предусматривают очистку белков: промывку, например, кислотой при pH 4,5 или 20–80%-ным раствором этанола, денатурацию их влаготепловой обработкой с последующей экстракцией водой [3]. Функциональные свойства белков улучшают обработкой паром или гомогенизацией. В последние годы для технологий концентратов, помимо традиционной сои, используют нетрадиционное растительное сырье (амарант, лен, подсолнечник и т. д.), а также биокатализ с преимуществами безопасности и функциональных свойств препаратов.

Изоляты являются наиболее очищенной формой белковых препаратов, так как содержат не менее 90% белка на сухое вещество. Белки обычно экстрагируются слабощелочным раствором (pH 8–11), осаждаются в изотонической точке (4,2–4,5), отделяются от углеводов и других соединений в виде творожистой массы, промываются, нейтрализуются до pH 6,8 и сушатся [2,3]. Эффективно использование мембранных технологий для очистки и выделения белков.

Текстурированные продукты придают пищевым изделиям волокнистую или многослойную (кускообразную) структуру [3]. После гидратации препараты по структуре напоминают мясо, птицу, морские продукты и используются для производства аналогов традиционных продуктов. Под влиянием температуры, увлажнения и механического воздействия при термопластической экструзии молекулы белка формируют многослойную массу с новыми поперечными связями.

Модифицированные белки получают из белковых продуктов с протеолитическими или иными ферментными препаратами микробиологического, растительного (папаин, бромелайн), животного происхождения (пепсин, химотрипсин, химозин) или кислотного гидролиза. Они используются как функциональные и вкусовые добавки к пище.

Сухая пшеничная клейковина (СПК) получается водной экстракцией небелковых и растворимых белковых компонентов из зерна пшеницы на специализированных предприятиях или заводах крахмального производства. Известно около 15 схем процесса получения СПК, различающихся по виду исходного сырья (зерно, мука), по методу отделения белка от крахмала (механический, ферментативный, химический), по качеству продукта (денатурированная, неденатурированная СПК) и по способу его получения (из теста, мучной болтушки). Предусматривается отделение крахмала и сушка продукта (кольцевые или пневматические сушилки типа «Ультра-ротатор»). Типичный химический состав СПК, % на сухое вещество: влажность 8, белок 77, зола 0,7, растворимые вещества 0,5, клетчатка 0,4, крахмал 18 [2].

3.2. Характеристика функциональных свойств белковых препаратов

Под функциональными свойствами белковых препаратов понимают такие физико-химические характеристики белков, которые определяют их поведение при переработке в пищевые продукты, обеспечивая определенные технологические и потребительские свойства [3]. При этом часть белков замещается или дополняется вводимыми белками в технологических процессах производства. Выражаются функциональные свойства как в численных значениях, так и в профилях зависимости от технологических факторов (температура, pH среды, время обработки и т. д.) [3]. Данный подход к оценке функциональных свойств нашел отражение в таких терминах, как «функционально-технологические» (ФТС) [4] или «техно-функциональные» [5,6], описывающих особенности процессов производства, хранения и потребления пищевых продуктов. Гидрофильные и гидрофобные группировки в белковых цепях обеспе-

чивают их взаимодействие с водой, жиром, углеводами и с другими соединениями, что приводит к образованию стабильных эмульсий, вязких, пенных, текстурированных и других видов пищевых систем. Наличие в одной полимерной цепи полярных и неполярных, заряженных и незаряженных группировок позволяет белкам вступать в реакции с различными видами соединений и тем самым влиять на качество пищевых изделий.

Наиболее важными ФТС являются: гидратация, растворимость, водосвязывающая способность (ВСС), жиросвязывающая (ЖСС), гелеобразующая (ГОС), пенообразующая способность (ПОС), жиросвязывающая способность (ЖЭС), стабилизация дисперсных систем (эмульсии, пены, суспензии), адгезионные, реологические свойства (вязкость, эластичность), способность к прядению и текстурированию (образование фибрилл, листов, слоев) [3]. Свойства белков обуславливаются последовательностью аминокислотных остатков в полипептидных цепях, зависящей от их природы (соя, пшеница, горох, рис и т. д.), соотношением гидрофобных/гидрофильных групп, количеством спирализованных вторичной структуры участков, присутствием фенольных соединений, углеводов, липидов и т. д., различной температурой, pH среды и видом обработки сырья (влаготепловая, давление, замораживание, сушка, ультразвук, экструзия, ферменты и т. д.) [7–11]. Так, белковые изоляты нута проявляли различия в функциональных свойствах, имея разный заряд и структуру [7]. Для изолятов всех исследуемых сортов была характерна вторичная структура β -листа. Лучшие ЖЭС свойства демонстрировали изоляты из сортов Hisar и Erzincan, лучшие ПОС – из черного нута и сорта Hisar. Изолят из сорта Yasa с высоким содержанием гидрофобных аминокислот проявлял наибольшую гелеобразующую способность, изоляты из сортов Yasa и Hisar хорошо растворялись в кислой среде, что благоприятно для приготовления напитков. Совместная экструзионно-ферментативно-гидролизная обработка соевых белков изменяла как конформационные, так и функциональные свойства [8]. Менялись молекулярные массы, гидрофобность, увеличивалось количество дисульфидных связей, уменьшалось число –SH групп и поэтому изменялись ЖЭС, ПОС и растворимость. Увеличение эмульгирующей активности и способности к пенообразованию сопровождалось снижением стабильности пены. На примере конских бобов [9] показано, что ультразвуковая обработка при 20 кГц, амплитуде 50–75% и 15–30 минутах воздействия увеличивала ЖСС и ПОС белков. Другими авторами [10] обнаружено, что способы сушки влияли на свойства белковых препаратов. Растворимость, ЖСС и стабильность пены у лиофилизированных нутовых изолятов была выше, чем у образцов, высушенных рефракционной оконной сушкой. Последние, наоборот, имели более высокие ВСС и стабильность эмульсии. У белковой композиции, полученной «сшиванием» из амарантового концентрата и сухой пшеничной клейковины с использованием фермента транслотаминазы, по сравнению с исходными белками, ВСС повышалась в 1,2–2 раза, ЖСС – в 1,1–1,4 раза, ЖЭС – в 1,15–2 раза, пенообразующие свойства – в 1,1–1,5 раза [11]. Изучение влияния гомогенизации под высоким давлением (ГВД), ультразвуковой обработки (УЗО) и их комбинации повлияло на структуру и на функции горохового изолята. ГВД и УЗО превращали нерастворимые белки в однородную дисперсию с меньшим размером частиц, с развернутой пространственной структурой и с открытыми остатками аминокислот [12]. Структурные изменения приводили к повышению растворимости, ПОС и ЖЭС белков.

Функциональные свойства растительных белковых препаратов из различных видов культур также различаются из-за особенностей структуры белков и их физико-химических свойств. Значения, например, ВСС у концентратов из различных видов и сортов зернобобовых культур (горох, фасоль, чечевица, нут) находились в пределах 0,6–4,9 г/г продукта, при этом белки гороха и нута характеризовались самой высокой ВСС и растворимостью [13]. ЖСС белковых изолятов из фасоли, полевого гороха и вигны варьировалась от 4,7–6,9 г/г, 5,5–7,2 г/г и 1,4–2,0 г/г соответственно. Белковые изоляты, приготовленные из различных линий фасоли (КВ) и полевого гороха (ФР), также различались по свойствам [14]. Белки КВ характеризовались большей β -структурой (38,6%) и меньшей α -спиралью (22,8%)

по сравнению с белками ФР (30,0% и 28,0% соответственно). Молекулярная масса белков КВ была выше, чем у белков ФР (~ 330 и ~ 155 кДа против ~ 150 кДа). Вследствие этих различий белки КВ обладали более высокой температурой гелеобразования и денатурации. Растворимость, стабильность эмульсии и ПОС зависели от заряда белков, а точка гелеобразования – от количества β -структуры [14]. В работе [15] показано, что изоляты, полученные изоэлектрическим осаждением, имели более высокий поверхностный заряд и растворимость и, как следствие, более высокую эмульгирующую активность по сравнению с изолятами, экстрагированными солью. При этом гороховый изолят имел самую низкую ЖЭС и стабильность эмульсии, что объяснялось высокой гидрофобностью, низкой растворимостью и зарядом. Нутовый и чечевичный изоляты лучше растворялись, они образовывали активные и стабильные эмульсии, что позволило считать их альтернативой соевым изолятам. Различия в функциональных свойствах обнаружены и для белков концентратов из белого и коричневого риса [16]. Установлено, что ЖСС, ВСС и растворимость белков концентратов (БК) из белого риса была на 10–15% выше, чем аналогичные свойства БК из коричневого риса; ПОС была выше почти в 5–6 раз, стабильность пены у БК из коричневого риса отсутствовала. Аналогичные закономерности отмечены и для ферментативных гидролизатов рисовых БК. Объяснением тому служили различия по элементам вторичной структуры, по содержанию фенилкарбоновых кислот, по гидрофобным свойствам, по молекулярным массам компонентов [16].

Одним из самых информативных ФТС белковых препаратов является гидратация [17–19], включающая растворимость и ВСС. Растворимость является важнейшим параметром функциональности белка, поскольку такие процессы, как денатурация и агрегация белка, напрямую связаны с этим свойством. Обезвоженные белки уже при 4–10%-ной относительной влажности связывают молекулы воды в мономерный слой, а при влажности 20–65% образуют два или более гидратных слоя. Между ВСС белков и их растворимостью прямая связь часто отсутствует. Слабо- и нерастворимые белки подвергаются набуханию с удерживанием воды, хорошо растворимые образуют коллоидные системы. Растворимость характеризуется коэффициентами КРА (коэффициент растворимости азота) и КДБ (коэффициент дисперсности белка). Первый коэффициент отражает количество азота, второй – количество белка, перешедшее в раствор, в процентах от общего содержания в продукте.

Растворимость растительных белков изменяется от 1–3% до 86–96% и более (Таблица 1).

При pH 2 показатель может достигать 76,0–83,9%, а при pH 5,0 он снижается с 5,3% до 9,6% [27]. Изменения растворимости отражаются на значениях других свойств. Так, самая низкая ЖЭС наблюдалась при pH 5,8, минимальная ПОС – при pH 5,0; максимальная ЖЭС отмечалась при pH 8,0, а наибольшая ПОС – при pH 7,0. Любая обработка, повышающая растворимость, может приводить к улучшению поверхностной активности, реологических и гидродинамических свойств [28]. Низкая растворимость часто взаимосвязана с природой белков, с температурной денатурацией или с агрегацией, иногда температурная обработка даже повышает их растворимость [23].

Гидрофобные участки на поверхности белков, как правило, препятствуют растворимости, гидрофильные, как и их заряд (дзета-потенциал), наоборот, ее повышают [15]. Гидрофобные группы белков могут освобождаться при растворении и осаждении, что приводит к усилению взаимодействий и к уменьшению значения данного показателя. Кроме поверхностного заряда, на растворимость белков влияют pH, вид и концентрация солей. Растворимость в кислых и щелочных средах повышается, а около изоэлектрической точки она понижается (pH 4–5) [20,29]. Исследования, например, пяти бобовых культур (горох, нут, соя, фасоль, чечевица), показали более высокую растворимость белков, полученных щелочной обработкой (85,9%), по сравнению с теми, которые получали с солью (61,5%). При щелочном выделении самую низкую растворимость имел изолят фасоли (61,4%), самую высокую – изолят сои (96,5%), а изоляты гороха, чечевицы, нута занимали промежуточное положение (более 90,0%) [30]. Исследование изолятов проводилось с использованием

Таблица 1. Растворимость белковых препаратов, % от общего количества белков

Table 1. Solubility of protein preparations, % of the total amount of proteins

Концентраты из пшеничных отрубей (N × 5,7) [20]	Концентраты рисовые (N × 5,95) [21]	Концентрат картофельный (N × 6,25) [22]	Изоляты соевые (N × 6,25) [23,24]	Клейковина пшеничная (N × 5,7) [25]	Концентраты гороховые (N × 6,25) [26]	Концентраты нуттовые (N × 6,25) [26]
14,0–52,7	8,1–40,2	28,2	> 70,0	1,15 ± 0,10	12,35 ± 0,20	12,20 ± 0,50

трех различных сортов гороха, полученных щелочной экстракцией с изoeлектрическим осаждением, солевой экстракцией с диализом (СД) и мицеллярным осаждением (МО). Также проводилась оценка поверхностного заряда, гидрофобности и функциональных свойств, включая растворимость [31]. Было установлено, что изоляты СД имели самую высокую растворимость белка (~ 89%), изоляты МО – самую низкую (~ 46%) при наименьшей ВСС (0,3–2,6 г/г) и высокой ЖСС (5,3 г/г). При этом различия в функциональности между сортами при одном и том же методе экстракции были минимальными. У белков подсолнечного шрота больше всего растворимость белков наблюдалась в растворах гидроксида натрия, по сравнению с растворами солей, карбонатов, бикарбоната натрия, при этом корреляции между молярностью гидроксида натрия и увеличением растворимости не наблюдалось [32]. Максимальная растворимость белков данного концентрата проявлялась в диапазоне pH 8–12, минимальная – при pH 5,0–6,0 [33], другие концентраты хорошо растворялись и при pH 2 [34]. Максимальная растворимость составляла 80% против 100% у белков сои, гороха и коричневого риса [33]. Снижение растворимости белков шрота подсолнечника отмечено под влиянием фенолов, в частности, хлорогеновой кислоты [35], однако и после удаления таких соединений растворимость не увеличивалась, а понижалась [36], таким образом, вопрос однозначного влияния подобного рода соединений на растворимость белков остается до сих пор не выясненным и возможно это связано с их природой.

При жестких условиях обработки (распылительная сушка, отбеливание спиртом, экструзия) изоляты, например, из гороха, маша, киноа имели низкую растворимость [10,37,38]. Данный показатель, как и другие свойства белков и их смесей, повышался при обработке их паром. Предположительно, причиной тому могло быть изменение соотношения S–S связи/SH– группы и синтез «сшитых» композитных белков. Перегруппировка связей между белками или внутри белков могла отразиться на аминокислотном составе и на свойствах белков, что не противоречит данным на примере других белков [25]. Регулирование pH в сочетании с тепловой обработкой и охлаждением «разворачивало» белковые молекулы и также их модифицировало. Обработку паром под высоким давлением с изменением pH, высокое давление с действием ультразвука использовали и другие авторы для создания белков и их композитов с улучшенными функциональными свойствами, включая и растворимость [16,39].

Водосвязывающая (ВСС) и жирсвязывающая (ЖСС) способности – это способности белков связываться с водой и жиром. Эти свойства необходимы для обеспечения текстуры, органолептических характеристик, срока годности. ВСС белковых продуктов обуславливается обычно гидрофильными полярными и заряженными боковыми цепями белков, как и наличием углеводов, имеющих сродство к молекулам воды [15]. Неспособность белка взаимодействовать с водой может привести к хрупкости и к сухости продукта [30]. Значения ВСС для белковых концентратов, полученных из различных зернобобовых, зерновых и из других видов культур (горох, фасоль, чечевица, нут, пшеница, овес), находятся обычно в диапазоне 1,6–6,8 г/г продукта [12,27,40], при этом вид культуры (соя > нут > гороха > чечевица > пшеничная клейковина), как и способ ее переработки, оказывали влияние на способность белков связывать воду [41,42,43]. Белки гороха и нута характеризовались наиболее высокой ВСС, как и их растворимостью в воде [8,44].

При изменении pH в щелочную сторону и при влиянии его на ВСС изолята белков маша наблюдалось образование гибких и растянутых структур на уровне их вторичной структуры [45]. Повышенная гибкость и новые межмолекулярные связи между остатками аминокислот, вызванные щелочным сдвигом при pH 12, улучшали ВСС белков и способствовали образованию гелей при наименьшей их концентрации. ВСС изолята увеличилась с 1,56 г/г до 4,81 г/г, точка гелеобразования снизилась с 22% до 15%. На основании того, что между белками образовывались прочные и эластичные термо-индуцированные гели, авторы заключили о возможности использования белков маша в производстве широкого спектра пищевых продуктов, включая растительное мясо [45].

ЖСС обусловлена взаимодействием неполярных боковых цепей аминокислот с алифатическими цепями масел/жиров [15]. Данное свойство зависит от вида, сорта и метода обработки культуры, находится оно обычно в пределах 1,0–3,96 г/г продукта [30]. При исследовании ЖСС белков из двух сортов нута, полученных щелочной, спиртовой и солевой экстракцией, установлено, что меньшая способность связывать масло при большей ВСС отмечалась у изолятов, выделенных с использованием соли [46]. Значения ЖСС и ВСС увеличивались с повышением содержания белка в препаратах, но в большей степени это увеличение проявлялось у ВСС.

Растительные белки, адсорбируясь на поверхности раздела фаз, образуют эластичные слои вокруг капель жира, снижая межфазное натяжение и предотвращая его коалесценцию. Благодаря этому, они обладают жироземмулирующей способностью (ЖЭС). Эмульсия, характеризующаяся как дисперсия/суспензия несмешивающихся жидкостей (масло/жир и вода), обычно термодинамически неустойчива из-за повышенного межфазного поверхностного натяжения.

За счет увеличения вязкости непрерывной фазы и снижения скорости в системе движения капель масло/жир белки стабилизируют эмульсии (СЭ). Доказана связь между поверхностной гидрофобностью, межфазным натяжением и эмульгирующими свойствами белков, например, гороха [15]. Гидрофобность и заряд на поверхности белков оказывают влияние на адсорбцию белков на поверхности раздела фаз. При этом отмечается высокий заряд для противодействия силам притяжения при стабилизации электростатических сил отталкивания между каплями масла. В изoeлектрической точке белки имеют суммарный нулевой заряд и не увеличивают ЖЭС.

Состав, молекулярная гибкость и другие физико-химические свойства белков у различных бобовых, зерновых, масляных культур разные. Установлено, что из-за большой растворимости и гидрофобности высокой ЖЭС обладали вицилины гороха [15]. Стабилизирующие свойства данной фракции белков в составе нестабильных эмульсий объясняли образованием вязкоупругой пленки вокруг капель масла. Свойства эмульсии, как и растворимость белков, зависели от их природы (горох, нут, фасоль, соя, чечевица), от метода обработки (щелочная, ультрафильтрация) [14,47] и от методов оценки ЖЭС и ЭС. Различные исследователи, как правило, используют разные методики [40], что привело к разбросу значений ЖЭС изолятов горохового белка от 21% до 76% [41,42]. Разница между соевыми и другими видами белковых продуктов в ЖЭС при этом была не существенной. Так, изоляты белков чечевицы и вигны, как и белки гороха, в зависимости от вида используемого метода оценки, также имели высокую СЭ (68–69%) и эмульгирующую активность (от 4,6 м²/г до 42,9 м²/г).

Среди различных форм белковых продуктов наименьшую ЖЭС при значениях pH, близких к изoeлектрической точке, имели изоляты. Значение ЖЭС повышалось при pH выше 7 [48] и достигалось 38–46% при стабильности эмульсии, равной 43–100%. На ЖЭС оказывало влияние как изoeлектрическое осаждение, так и солевая обработка с изменением соотношений фракций глобулин/альбумин или леугмин/вицилин [14]. На зависимость величины ЖЭС от фракционного состава белков указывали и данные, полученные при исследовании белков подсолнечника [32]. Альбумин его белков был более эффективным, чем, например, гелиантинин, а СЭ была выше у нерастворимых белков, чем у растворимых. Другие авторы указали на то, что ЖЭС альбуминов подсолнечника ниже, чем у соевых белков при аналогичной СЭ [33]. При ультразвуковом воздействии на эмульсию из масла чиа с гороховым белком стабильность эмульсий повышалась (до 7 дней) при одновременном в них торможении процессов окисления [49]. Исследованиями свойств белковых концентратов, приготовленных из ячменной муки (*Hordeum vulgare* L.) с щелочной и ферментативной обработкой, показано, что более мягкие условия с такими ферментами, как амилаза и глюканаза, обеспечили ЖЭС, сопоставимую с ЖЭС изолята сывороточных белков [50].

Пенообразующая способность (ПОС) – это способность белков образовывать пену. Как и эмульсии, пены имеют две несмешивающиеся фазы: водную и газовую. Белки в растворе, адсорбируясь на границе раздела газ-жидкость, образуют вязкоупругую пленку, помогающую противостоять разрыву и слиянию пузырьков. Выявлена положительная связь ПОС с величиной дзета-потенциала и растворимостью для белковых изолятов из различных сортов гороха [15]. Чем сильнее был заряд на поверхности белков, тем выше их ПОС за счет ослабления гидрофобных взаимодействий, а также ввиду повышения растворимости и гибкости белков. В результате белки быстрее растекались и инкапсулировали частицы воздуха на поверхности раздела фаз. Альбумины бобовых имели при этом большую ПОС и стабильность пены (СП), чем глобулины с пониженной способностью ориентироваться на границе раздела двух фаз.

Как и растворимость, белки зернобобовых культур (фасоль, горох, нут) имеют более высокое пенообразование при кислом и щелочном значении pH и менее высокое – около изoeлектрической точки. Для захвата пузырьков воздуха и капель масла белки должны хорошо растворяться, чтобы они могли быстрее мигрировать к границе раздела фаз и перестраиваться для образования эластичной пленки [15]. При исследовании ПОС белковых продуктов из гороха и нута, полученных с ультрафильтрацией и щелочной обработкой, было обнаружено, что способность образовывать пену у концентрата гороха не зависела от метода обработки [10,51]. Но концентрат нута, экстра-

гированный с использованием щелочи, имел более низкую стабильность пены. При этом ПОС изолята гороха была выше, чем у сухого обезжиренного молока, пшеничной муки, соевого изолята [52], поэтому сделан вывод о целесообразности его использования в качестве стабилизатора в таких пенных системах, как безе, взбитые десерты, муссы [53]. На ПОС концентрата белков из рисовых отрубей оказывало влияние pH: ПОС и стабильность пены при pH 8 равнялись 42% и 31,5 мин соответственно, тогда как при pH 10 – 54% и 43,5 мин. Эти значения находились в пределах обычных величин и для других белков (40–90% и 30–90 мин) [54]. Важно отметить, что способы и условия выделения белков влияют не только на их функциональные свойства, но и на усвояемость [55]. Изоляты белка, полученные из гороха, чечевицы, нута и фасоли соле-мембранной технологией, демонстрировали более высокую растворимость, ПОС и эмульсионную активность по сравнению с изолятами, полученными изoelekтрическим осаждением. Однако их усвояемость *in vitro* была ниже, что необходимо учитывать при использовании таких белковых изолятов в пищевых продуктах различного назначения.

Растительные белки при концентрации 15–25% имеют тенденцию к образованию вязких растворов и к формированию гелей, поэтому в эмульсиях, например, из-за склонности к данному свойству, массовую долю белков обычно ограничивают 10% [56]. Гелеобразование — это процесс межмолекулярного взаимодействия белков с образованием трехмерной сети структур в системах белок–вода, белок–жир, белок–белок. Процесс гелеобразования зависит от концентрации, pH, температуры, ионной силы среды, присутствия добавок, эндогенных, экзогенных ферментов. Сорт культуры, состав белков и методы обработки оказывают влияние на их гелеобразующие свойства. Показано, что температура гелеобразования белков зависит от термической стабильности, при этом она была выше температуры термической денатурации [15]. Так, у изолятов, полученных из различных сортов фасоли и гороха, температура гелеобразования находилась в диапазоне 87,4–94,5 °C и 84,0–93,1 °C, а температура денатурации — в диапазоне 85,7–93,3 °C и 82,7–85,5 °C соответственно. Повышенная температура гелеобразования у изолятов фасоли была взаимосвязана с более высоким количеством β -структур, с большей площадью поверхности и с более сильными межмолекулярными взаимодействиями. Температура денатурации дисульфид-связанных кислот и основных субъединиц леумина гороха, в зависимости от их соотношения, равнялась 69–77 °C, тогда как температура денатурации совместно с агрегацией — 75–85 °C. Причина различий была взаимосвязана с диссоциацией и перегруппировкой олигомеров леумина за счет гидрофобных взаимодействий и реакции обмена сульфгидрильные/дисульфидные связи [57]. Скорость нагревания горохового изолята не влияла на гелеобразование, а скорость охлаждения, наоборот, оказывала влияние [58]. Щелочная обработка горохового изолята понижала гелеобразование, по сравнению с методом концентрирования белков [59], а использование раствора 0,3 M NaCl при pH 4,0, наоборот, усиливало получение плотного геля [15]. Таким образом, на свойства растительных белков образовывать гели, как и на все описанные выше свойства, оказывали влияние различные факторы воздействия.

3.3. Модификация структуры и функциональных свойств белков

Белки зернобобовых, зерновых и масличных культур содержат реакционноспособные группы остатков аминокислот, поэтому для них, как для полипептидов, характерны реакции химической, физической, физико-химической и ферментативной модификации. Из химических методов наиболее известны реакции ацилирования аминокислот янтарным (сукцинирование) и уксусным (ацетилирование) ангидридами, дезамидирования (удаление амидных групп глутамина, аспарагина) и фосфорилирования [2,60].

Реакции ацилирования приводят к повышению суммарного отрицательного заряда молекул из-за ковалентного присоединения остатков янтарной/уксусной кислот к ϵ -группам остатков лизина. Степень ацилирования возрастает за счет реакций с участием гидроксильных групп серина, треонина, тирозина. Электростатическое отталкивание одноименно заряженных групп приводит к структурным изменениям в белках и даже к их распаду. Примером такого распада является образование субъединиц из 11S гороховых белков с одновременным разрыванием их глобулярной структуры [60]. Благодаря изменению пространственной структуры белков и заряда на молекулах, усиливались гидрофобные свойства, улучшались ЖЭС, ПОС, изменялись растворимость и гелеобразующая способность. Сукцинированные и ацетилированные леумины бобовых образовывали высокоустойчивые эмульсии «масло в воде» [60]. Полипептиды способны формировать гели при меньших значениях концен-

трации, pH и температуры, по сравнению с нативными белковыми глобулами. Стабилизация структуры геля происходила за счет ковалентных сшивок модифицированных белков, при этом с возрастной степени модификации прочность гелей уменьшалась, поэтому для ацетилированных белков рекомендована ее средняя степень.

Дезамидирование белков осуществляется с помощью реакций, при которых из молекул амидная группа аспарагина и глутамина удаляется с образованием аммиака. Продукты химического дезамидирования зависят от pH, температуры и последовательности аминокислотных остатков в белках [61]. При щелочных и нейтральных значениях pH чаще происходит дезамидирование аспарагина. В кислых условиях оно протекает с гидролизом остатков аспарагина и глутамина до соответствующих кислот. Превращение амидных групп в кислотные частично расщепляет белки, в результате чего образуются амфифильные молекулы, которые выполняют роль поверхностно-активного вещества при образовании пен и эмульсий. Гороховый белок, например, полностью подвергался дезамидированию обработкой 2 моль/л HCl при 121 °C в течение 3 часов с усилением его поверхностной гидрофобности и с улучшением функциональных свойств [62]. В организме же человека дезамидирование может вызывать структурные изменения белков матрикса и клеток нейронов, что приведет к нарушению их функций [63], поэтому в технологических процессах модификацию целесообразнее осуществлять с помощью ферментативных реакций из-за меньшей опасности последних.

Фосфорилирование — процесс улучшения функциональных свойств белков при участии реакционных групп, присущих природным фосфопротеинам, таким, как казеин [64]. Влияние фосфорилирования оксихлоридом фосфора на конформацию белков, например, крециферина семян рапса, изучено с помощью SDS-PAGE, ВЭЖХ, ультра-центрифугирования, вискозиметрии, гидрофобности. Обнаружено, что фосфорные группы после реакции при pH 8 почти в равной степени присоединялись к NH_2 - и OH - группам, тогда как фосфорилирование при pH 10–11 вызывало преобладающее протекание реакции O -фосфорилирования. Компонент с молекулярной массой (ММ) 50 кДа был продуктом ковалентного сшивания полипептидных цепей, а фракция 2,5S оказалась основным продуктом диссоциации, протекающей уже после модификации. Чем выше степень фосфорилирования, тем больше образовывалось продуктов с повышенной гидрофобностью. Фосфорилирование горохового изолята по OH -группам серина и треонина при pH 12, при температуре 70 °C и 7,0% трифосфата натрия повышало его растворимость, ЖЭС, ЖСС, ПОС и СЭ [65]. При этом структура модифицированных белков, по данным сканирующей электронной и инфракрасной спектроскопии, имела однородную ламеллярную структуру с повышенным содержанием α -спирали, β -структуры, но с меньшим количеством β -изгибов и нерегулярных спиралей. Результаты отразились на 20% снижении количества сливок при изготовлении тортов с данным изолятом совместно с 0,4% ксантановой камедью [65].

Физическая модификация растительных белков распространена достаточно широко [66]. К ней относится, прежде всего, их термическая обработка. Мягкие режимы способствовали разворачиванию соевых белков и расширению функциональности, жесткие режимы необратимо изменяли структуру с денатурацией и агрегацией при участии дисульфидных, гидрофобных связей и электростатических сил с ухудшением таких свойств. Нагрев соевых белков повышал их термическую стабильность [67], у рисовых глютелинов увеличивалась ПОС [68], у альбумина из псевдозлаковых — гелеобразующие свойства [69], у белков фасоли — ВСС [70]. Улучшение свойств наблюдалось и с применением радиочастотного и микроволнового нагрева, но при низкой скорости и с тремя частотами: 13,6, 27,1 и 40,7 МГц, разрешенными для использования в США [71]. На эффективность нагрева соевых белков влияли диэлектрические свойства, pH, концентрация и температура. Структура белков при этом изменялась за счет разрыва дисульфидных связей и увеличения гидрофобных свойств [72]. После радиочастотной обработки белков рисовых отрубей в их вторичной структуре увеличилось количество случайных клубков, уменьшилось содержание β -листов и α -спиралей. Третичная структура также изменялась, о чем свидетельствует снижение флуоресценции триптофана и усиление гидрофобности. Эти изменения привели к увеличению ЖЭС белков при температуре 80 °C [73]. Радиочастотное излучение являлось эффективным и для улучшения ЖСС и ЖЭС кукурузных белков [74]. Гомогенизация гороховых белков под давлением и микрофлюидизацией понижала размер частиц, в результате до 86% повышались растворимость [75] и стабильность эмульсии [76]. Функциональные свойства белков мoringa (масличной (*Moringa oleifera*), полученных из обезжиренного порошка семян

после обработки ультразвуком с оптимизацией процесса [77], где факторами были амплитуда, продолжительность обработки, гидро-модуль, также были улучшены. Растворимость, ЖЭС и ПОС были увеличены на 42, 33 и 73% соответственно по сравнению с необработанным концентратом. Изменения в свойствах сопровождались структурной модификацией во вторичной и третичной структурах белков, что подтверждено инфракрасной спектроскопией и спектральной флуоресценцией [78]. При изучении влияния γ -технологии облучения рисового белка на физико-химические и функциональные свойства было выявлено увеличение растворимости белков до $69,18 \pm 1,07\%$, ЖСС до $3,45 \pm 0,04$ г/г, стабильности эмульсии – до $45,65 \pm 1,26$ мин, эмульгирующей активности – до $208,33 \pm 4,79$ м²/г [78]. Изменение свойств авторы объяснили уменьшением размера частиц. При этом содержание β -структур составляло не менее $31,16 \pm 0,16\%$, неупорядоченной структуры – не более $14,56 \pm 0,06\%$, а поверхностная гидрофобность усиливалась.

Обработка гороховых белков этанолом при низкой температуре улучшала реологическую стабильность эмульсий, особенно при высоких концентрациях, что делает ее перспективной для использования белковых добавок в пищевой промышленности [79]. Текстурирование белков с низким содержанием влаги считается также перспективной технологией с получением волокнистой структуры из растительных белков, подобной мясу животных [80,81]. Соевые ингредиенты наиболее часто используются в аналогах мяса из-за их характерных функциональных свойств, таких как ВСС, ЖСС, гелеобразующая способность и ЖЭС [82]. Так, для изучения влияния свойств концентратов соевого белка на качество текстураторов авторы работы [81] использовали 12 коммерческих образцов и показали различия в степени текстурирования, в свойствах и в сенсорной оценке продуктов. Статистический корреляционный анализ показал, что на качество продуктов оказывали влияние индекс растворимости азота, ВСС, ЖЭС, ПОС, прочность геля и содержание –SH групп в сырье. Добавление 5% 7S или 5% 11S субъединиц соевого белка повышало ВСС изолята до 9,04%, скорость регидратации – до 25,71% [83]. Белки 7S обеспечивали более высокую скорость регидратации при более низкой температуре (30 и 45 °C) по сравнению с белками фракции 11S. После экстракции содержание свободных, общих –SH групп и –S–S–связей в белках снижалось, а количество нерастворимых полимеров увеличивалось. Соотношение различных компонентов соевого белка в изоляте изменяло текстуру, ВСС и регидратационные характеристики, что могло бы обеспечить появление нового метода с использованием данного показателя оценки качества текстураторов. Текстурирование изолятов гороха с высоким содержанием незаменимых аминокислот, как и текстурирование изолятов сои, маша, арахиса, а также клейковины, повышало ВСС, ЖСС, ЖЭС белков и делало их приемлемыми для получения аналогов мяса [84]. Соевый белок и клейковина, как известно, обладают ограничениями, связанными с пищевой аллергией и дисбалансом незаменимых аминокислот. Поэтому для рецептов были выбраны гороховые текстураты. Текстураты на основе гороха, сои и клейковины имели высокие свойства, тогда как текстураты из белков маша и арахиса обладали низкой регидратацией и текстурными свойствами. Таким образом, следует подчеркнуть, что природа белков является важнейшим фактором, влияющим на функциональные свойства растительных препаратов, включая свойства текстураторов.

Эффективным подходом к улучшению растворимости, термостабильности и других свойств белков является образование их комплексов с полисахаридами на основе электростатических сил [85] или других механизмов. Образование комплексов было подтверждено исследованиями с гуммиарабиком [86], альгинатами [87], пектином со степенью этерификации более 50% [88], каррагинаном, ксантановой, геллановой камедью, хитозаном [89,90]. Ионные полисахариды улучшили функциональные свойства соевых и гороховых белков за счет изменения их вторичной структуры. Гели с геллановой камедью и ионами калия были более жесткими и меньше теряли воду в результате синергизма, чем с натрием. Камеди структурировали сетку гелей с 10–15% горохового белка и приближали их к продуктам животного происхождения. При использовании гидролизатов соевых белков в комплексе с галактоманнанами при контроле их концентрации и ММ также наблюдалось улучшение их функциональных свойств для применения в рецептурах пищевых продуктов [91]. Фазовые переходы в концентрированных белковых системах при взаимодействии белок–белок, белок–полисахарид, белок–липиды и белок–вода существенно влияли на текстуру и на общее вкусовое качество мясных аналогов. Отмечено, что не только липиды, полисахариды, вид и концентрация белков, но и параметры их обработки (влажность, температура, pH) оказывали влияние на регулирование

поведения белковой фазы в процессе реструктуризации при производстве аналогов из говяжьего, куриного и другого вида мяса [92]. Взаимосвязь «структура–функция–процесс» продолжает оставаться востребованной и для дальнейших исследований.

Установлено, что текстурированные гороховые и соевые белки могут быть использованы в качестве модификаторов свойств гидрогелей инулина при концентрации 6 г/100 г [93]. Структура гидрогелей становилась более когезивной и в 7–10 раз более прочной, но менее зернистой и текучей по сравнению с контрольным образцом за счет уменьшения скорости движения частиц компонентов. Комбинация горохового белка с данным полисахаридом понижала генную активность белка, участвующего в распаде мышц крыс, и повышала активность ферментов митохондрий при выработке в них энергии (цитратсинтаза, 3-гидроксиацил-CoA-дегидрогеназа) [94]. Доказательством взаимодействия белков с инулином служат данные, полученные при экстракции последнего из клубней артишока. Выход инулина повышался с 67,6% против 57,3%, если его экстрагировали первым, а не после предварительного удаления белков [95]. Важно отметить, что влияние инулина на свойства растительных белков сегодня изучено недостаточно, тогда как получение их комплексов с пребиотиком перспективно, чтобы использовать в пищевых системах функционального назначения.

Гликозилирование белков – модификация, представляющая собой присоединение линейных или разветвленных олигосахаридных цепей к белку с получением гликопротеинов. Так как данный процесс затрагивает аспарагиновые остатки, обозначаемые как N–остатки, то он называется N–гликозилированием. Реакция без участия ферментов включает образование шиффовых оснований и продуктов Амадори, образование карбонильных соединений и конечных продуктов. Так как олигосахариды имеют гидрофильную природу, то ковалентное включение N–связанных гликозидов в состав растительных белков приводит к усилению полярности и к увеличению растворимости [96]. Простое смешивание соевых белков с мальтодекстрином увеличивало поверхностную гидрофобность, снижая растворимость, но повышая ВСС и прочность геля. Однако гликозилирование, наоборот, приводя к менее компактной третичной структуре молекул, увеличивало растворимость и уменьшало ВСС и прочность геля [97].

Функциональные свойства белков могут быть улучшены с помощью биотехнологических модификаций, таких как ограниченный протеолиз с ферментами животного (трипсин, химозин, химотрипсин, пепсин), растительного (папаин) или микробиологического (алкалаза, флавозим, протацид и т. д.) происхождения, дезамидирование и другие виды [66]. Процессы протекают с учетом особенностей действия различных энзимов [98]. Гидролиз белков с участием ферментов предпочтительнее, по сравнению с химическим распадом, из-за мягких условий, отсутствия побочных реакций, безопасности и ввиду субстратной специфичности энзимов. Свойства гидролизатов зависят от степени гидролиза, от вида ферментов (эндо-, экзо-протеазы) и от природы субстрата. Результатом гидролиза является уменьшение молекулярных масс (ММ), увеличение ионизированных групп или гидрофобных участков, что при определенной глубине гидролиза положительно отражается на растворимости и на других функциональных свойствах [66]. Трипсин, расщепляя пептидные связи с участием лизина и аргинина и повышая тем самым межфазовые свойства горохового [99] и овсяного белка [100], улучшал ЖЭС и ПОС. Реакция гидролиза гороховых белков с трипсином приводила к частичному разворачиванию молекул, к расщеплению пептидных связей α -цепей, к понижению ММ белка с 340 до 240 кДа и к появлению гидрофобных групп, взаимодействующих с каплями масла [101]. Молекулы белков становились более компактными, сферическими, термодинамически стабильными и улучшали ЖЭС и ПОС, проявляя при этом антиоксидантные свойства [101]. С данными гидролизатами снижалось окисление липидов рапсового масла в эмульсиях при хранении, предназначенных для микрокапсулирования. Химотрипсин, подобно пепсину, гидролизировал связи, образованные гидрофобными аминокислотами (триптофан, фенилаланин), хотя и в меньшей степени, чем другие ферменты [102]. При этом он эффективнее других ферментов улучшал показатели ПОС и ЖЭС белков конских бобов [103]. Ферментный препарат химозин, сходный по специфичности с пепсином А, также был использован для улучшения ПОС, растворимости и ЖЭС изолята гороховых белков [104]. Между растворимостью и ЖЭС наблюдали умеренную корреляцию ($r = 0,74$). Другие авторы [105] также установили улучшение растворимости горохового изолята с данным ферментом при pH 2,0–5,0 после гидролиза в течение 10–30 минут. Из люпина получены пептиды с улучшенными функциональными свойствами, антиоксидант-

ной, иммуномодулирующей, гипотензивной, гипогликемической и гиполипидемической активностями [106], а из овсяных отрубей с папаином — пептиды с антиоксидантными и металлохелатирующими свойствами [107]. С папаином получены гидролизаты с высокой растворимостью и биологической ценностью из изолятов белков арахиса [108] и люпина [109], а с бромелайном (степень гидролиза до 16%) — пептиды из белков люпина с повышенной прочностью геля и эмульгирующей активностью, но с более низкой стабильностью эмульсий [109].

Гидролиз растительных белков с микробными протеазами из-за их широкой специфичности и сроков производства имеет преимущества по сравнению с ферментами животного происхождения [110]. Однако многие белковые гидролизаты приобретают горький вкус из-за высвобождения пролина и гидрофобных аминокислот. Поэтому важно уменьшить или полностью исключить горечь, например, с помощью специфических пролилэндопептидаз из группы сериновых протеиназ. Они способны к ограниченному протеолизу по пролиллэйциновым пептидным связям и остаткам гидрофобных аминокислот [110]. Из бактериальных препаратов с эндопротеазами наиболее широко известны алкалаза, нейтраза, протамекс, из грибных с эндопротеазами — дистицим протацид экстра, а также флаворизм, содержащий экзопептидазы амино- и карбоксипептидазного типов. Исследование гидролиза сухой пшеничной клейковины (СПК) различного качества экзо- и эндопротеазами показало: чем крепче клейковина, тем глубже протекал ее гидролиз под действием эндопротеиназ (Neutrase 1,5; Protamex). В то же время для более слабой клейковины эффективнее оказывалось действие комплекса эндопротеаз и экзопептидаз препарата Flavourzyme 500 [111]. Изменение ММ полипептидов зависело от дозировки ферментов и от реологических свойств клейковины. В работе [112] отмечен потенциал ферментативных гидролизатов нуттового изолята под действием дипептидилпептидазы-IV, ангиотензинпревращающего фермента и алкалазы для регулирования эмульгирующих и биоактивных свойств (переваривание, антиоксидантная активность) белков. При этом предпочтение отдано времени гидролиза 10 минут вместо 210 минут.

Для улучшения растворимости, ЖЭС, ПОС и других функциональных свойств растительных белков использовались ферментативные методы дезамидирования с транслглютаминазой, протеазами и протеинглутаминазой (ПРГлю) [113]. Последняя, для определения активности которой разработан новый метод с моделированием в среде высокого давления [114], наиболее часто используется для обеспечения соответствия растительных аналогов по вкусу и текстуре животным белковым продуктам. Растворимость изолята соевого белка с ним повышалась на 55,74%. Впервые фермент получили из бактерии *Chryseobacterium proteolyticum* [115] и установили, что он реагирует с остатками глутамин в белках и не реагирует с остатками аспарагина и со свободным глутамином. ПРГлю считают идеальным ферментом для дезамидирования белков [116]. Данная реакция модификации клейковины после обработки ферментом, наряду с повышением ЖЭС, ПОС и растворимости, улучшала и ее гелеобразующие свойства [117]. Кроме того, дезамидирование глиадина как основного аллергенного белка клейковины при использовании карбоксилированной катионообменной смолы снижало его реактивность по отношению к сыворотке пациентов с положительной реакцией на кишечную проницаемость, а также уровни аллергена и гистамина. Белки из зерновых, бобовых, масличных семян были использованы и для получения пищевых коллоидов, включая комплексы с белками, металлами и углеводами для улучшения пищеварения и биодоступности биологически активных веществ [118].

Для улучшения свойств белков и продукции в основном животного происхождения (куриный бургер, продукты из говядины, свинины, йогурты) используется микробная транслглютаминаза (мТГ), катализирующая ковалентное сшивание белков с участием изопептидных связей между остатками глутамин и лизина. В меньшей степени фермент применяется в тофу, хлебобулочных изделиях и макаронах [119]. При использовании мТГ при различных концентрациях с улучшенным процессом гелеобразования соевого изолята в аналогах мяса и/или морепродуктах методом SDS-PAGE электрофореза показано, что под ее влиянием при концентрации 5 и 7 ед/г происходила полимеризация белков вицилина и легумина с повышенным содержанием агрегатов β -листов. Белки усиливали гибкость, стабильность и прочность гелевых сеток. Данные подтверждены и на примере изолята белков нута, которые получали солевой экстракцией с последующей ультрафильтрацией и действием мТГ [120]. Межмолекулярные β -листные и β -витковые структуры обеспечили высокую прочность геля, при этом нуттовый изолят имел меньшую величину ЖЭС по сравнению с гороховым. Для гороховых белков

обработка их мТГ являлась благоприятной для улучшения текстуры и реологических свойств гелей и эмульсий при хранении [121]. мТГ использовалась и для экструзионного текстурирования изолятов, концентратов соевых, гороховых, арахисовых, рисовых белков и пшеничной клейковины для получения заменителей мяса [122]. Из компактных структур белки превращались в более растянутые и случайные спиральные структуры. Интенсивнее этот процесс протекал у клейковинных и рисовых белковых изолятов, что приводило к получению рыхлой текстуры в отличие от более агрегированных глобулиновых 11S белков сои и гороха. Действие фермента зависело от природы растительного белка, что подтвердилось и на примере хлеба [123]. Белки риса и киноа являлись подходящими субстратами для мТГ в составе закваски, в отличие белков овса и нута. Добавление мТГ в состав закваски из киноа, коричневого и белого риса повышало удельный объем хлеба, сжимаемость мякиша и газодерживающую способность теста. Из-за чрезмерного сшивания белков с мТГ тесту требовалось больше воды. В других исследованиях фермент использовался для улучшения биологической ценности белковых композиций из различных видов растительных культур [11].

Особый интерес для использования белков в практических целях представляют реакции ферментативного их синтеза из пептидов (пластеиновый синтез) различной химической природы с целью улучшения растворимости, поверхностно-активных свойств и биологической ценности [2], однако реакции мало изучены и нуждаются в дальнейшем исследовании.

3.4. Взаимосвязь молекулярной структуры белков с их физико-химическими показателями

Для регулирования функциональных свойств белковых препаратов в целях обеспечения качества пищевых продуктов наиболее важными остаются сведения о взаимосвязи особенностей молекулярной структуры белков с их физико-химическими показателями [25,124]. Так, были изучены физико-химические и структурные особенности белков альбумина (АЛ), глобулина (ГЛ) и целого изолята, полученных из голубиногорного горошка (*Cajanus cajan*) при значениях pH от 8 до 11 [125]. ГЛ имел характеристики белковых агрегатов и полипептидов субъединиц 7S вицилина (150–180 кДа), в то время как АЛ — полипептидов с более низкой молекулярной массой. Исследования конформационных характеристик флуоресцентной спектроскопией и дифференциальной калориметрией, а также стабильности белка измерением теплообмена с денатурированием молекул при нагревании с постоянной скоростью показали, что ГЛ имел большую конформационную стабильность и более компактную, но менее гибкую структуру с высокой долей β -нитей, по сравнению с фракцией АЛ. Унефракционированного изолята наблюдалось самое высокое извлечение белка из-за большего присутствия белковых агрегатов с наименьшей долей β -нитей. По мере увеличения pH экстракции процент раскрученного белка и взаимодействие гидрофобных остатков с растворителем увеличивались, что положительно отражалось на свойстве растворимости. Сделан вывод, что изменение pH для экстракции белков является простым и малозатратным методом получения изолятов с физико-химическими и структурными особенностями, определяющими функциональные свойства для целенаправленного использования их в качестве пищевых ингредиентов [125]. При доказательстве комплексообразования изолята соевого белка (БИ) с β -глобулином (Г) и мирицетином (М) с использованием методов кругового дихроизма, 3D-флуоресцентного анализа, УФ-спектроскопии и гель-хроматографии установлено, что в комплексе изменялась структура белков [126]. β -слой уменьшался до 29%, хаотичная спираль увеличилась до 35%, а молекулярная масса повышалась с $6,68 \times 10^5$ до $1,17 \times 10^6$ г/моль. Глицинин (11S) обладал лучшим сродством к модификаторам, чем β -конглицинин (7S), за счет взаимодействия с участием водородных связей. Данные получены для рыночного продвижения соевых продуктов в качестве функциональных ингредиентов. Для улучшения функциональных свойств изолята соевого белка (ИСБ) в его состав была введена карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ) в среде с низким значением pH (4,0 и 5,0) [127]. КМЦ адсорбировалась на поверхности ИСБ при участии электростатических и водородных связей. Индекс активности и индекс стабильности эмульсий при этом были более высокими, чем у эмульсий с ИСБ. Формирование стабильных межфазовых слоев в эмульсиях с комплексом белок–полисахарид доказано с помощью изображений, полученных на микроскопе.

При исследовании различий в физико-химических свойствах, таких как выход, молекулярные массы, Z-потенциал, гидрофобные аминокислоты, у белков нута и их фракций (альбумины — АЛ, глобулины — ГЛ и глютелины — ГЛ), по сравнению с овальбумином

яйца (ОВ), выявлена корреляция между вторичной структурой белков и значениями ЖЭС и ПОС. Более высокие поверхностные свойства белков нута, по сравнению с ОВ, свидетельствовали об их потенциале для использования в качестве стабилизаторов пен и эмульсий [128]. Индекс поверхностной гидрофобности, измеренный флуоресценцией с 1-анилинонафталин-8-сульфоновой кислотой, поверхностное натяжение, определенное на оптическом тензиометре, выявленные химические группировки и расположение связей ИК-спектроскопией с преобразованием Фурье показали, что лучшей фракцией по исследуемым свойствам была фракция ГЛ. Однако для замены ОВ на белки нута рекомендована более дешевая общая фракция белков, также с хорошими функциональными свойствами и с меньшей аллергенностью. Методами щелочной экстракции с изoeлектрическим осаждением и солевой экстракцией из зеленого горошка и нута были выделены глобулины и их фракции – леугмин (ЛЕ) и вицилин (ВИ) [129] и установлено, что ЛЕ имел более высокую СП, СЭ и термическую стабильность, по сравнению с ВИ. Это было связано с большим содержанием в них серосодержащих аминокислот, SH– и S–S–групп и большей ММ белков. Тем не менее ВИ больше растворялся в воде и имел более высокую ПОС и ЖЭС, по сравнению с ЛЕ, из-за более низкой ММ и менее жесткой структуры. ПОС белков ВИ составляла 183,33%, тогда как ЛЕ – всего 36,33%, эти белки содержали и наименьшее количество ароматических соединений. Данные явились важнейшей информацией для выведения новых сортов бобовых, в том числе и тех, в которых могли бы отсутствовать нежелательные запахи.

Исследованиями структурных особенностей гороховых белков показаны различия не только в растворимости, но и в перевариваемости, в зависимости от методов их экстракции [130]. Растворимость белка в фосфатном буфере была ниже для белков, выделенных щелочной экстракцией и изoeлектрическим осаждением (ЩЭ) (27%), по сравнению с белками изолята, полученными солевой экстракцией СЭ (77%). Изменения энтальпии, связанные с денатурацией белка, были выше для ЩЭ, по сравнению с СЭ, то есть белки СЭ были более нативными, чем белки ЩЭ. Для ЩЭ обнаружено больше межбелковых гидрофобных взаимодействий, чем для СЭ, что также объясняло их более низкую растворимость, как и константу скорости протеолиза и переваривания *in vitro* из-за их денатурации.

Оценка влияния полифенолов на белки концентрата риса также исследована методами исследования молекулярно-структурных характеристик их комплексов [131]. Доказано ковалентное взаимодействие кофейной и кумаровой кислот фасоли с концентратом рисовых белков. Конъюгация сопровождалась уменьшением размеров до 178,4 нм, появлением отрицательных зарядов, амидов I, II, III с полосами колебаний при 3784,92, 1631,07 и 1234 см⁻¹ соответственно, уменьшением кристалличности и степени непрерывности поверхности. Последняя определена сканирующей электронной микроскопией. Термогравиметрический анализ выявил высокую термическую стабильность комплекса, который со своими положительными характеристиками в составе фруктового смузи улучшал текстуру, консистенцию и вкус, по сравнению с контрольным продуктом [131].

Для разработки способов регулирования функциональных свойств сухой пшеничной клейковины (СПК) предназначались данные об их зависимости от реологических показателей качества и аминокислотного состава белков [25]. Растворимость коррелировала с суммой неполярных аминокислот целой клейковины и имела отрицательную корреляцию с суммой аминокислот глинадина. Для ВСС СПК была найдена обратная зависимость от суммы полярных аминокислот двух фракций глютеина ($r = -0,67$ и $-0,98$), для ЖСС – прямая зависимость от суммы полярных аминокислот глинадина ($r = 0,78$) и целого комплекса СПК ($r = 0,95$) и обратная зависимость – от суммы неполярных аминокислот растворимого и нерастворимого глютеина ($r = 0,86$ и $0,92$). ЖЭС положительно коррелировала с сум-

мой неполярных аминокислот целой СПК ($r = 0,70$) и глинадиновой фракции ($r = 0,86$), отрицательно – с суммой полярных аминокислот СПК ($r = -0,62$). ПОС была взаимосвязана с суммой неполярных аминокислот глинадина ($r = 0,79$) и обеих фракций нерастворимого глютеина ($r = 0,95$). Функциональные свойства СПК возможно предсказать, исходя и из ее гидратации и деформации сжатия (упругость) ($N_{\text{деф}}$), обычно используемых для оценки хлебопекарных свойств муки. Наибольшей ПОС обладала СПК с гидратацией 190–200%, наибольшей ЖЭС – СПК со значением 140–150%. В целях обеспечения большей ПОС целесообразно использовать СПК с $N_{\text{деф}}$ 70–80 ед. приб.; для повышения ЖЭС и ЖСС – СПК со значениями $N_{\text{деф}}$ 60–80 ед. приб.; а для повышеуия ВСС – с $N_{\text{деф}}$ 50–70 ед. приб. Полученные результаты показывают, что СПК можно использовать не только в хлебопечении, но и в других пищевых системах, таких как кондитерские изделия, эмульсии, пены и т. д.

Несмотря на значительный прогресс в изучении связи между молекулярно-структурными и функциональными свойствами растительных белков, требуется дальнейшее исследование с использованием современных методов. Это позволит получить новые знания, которые производители смогут использовать для обеспечения необходимого качества пищевых продуктов.

4. Заключение

В последние годы к растительным белкам обращено особенно пристальное внимание научного сообщества, производителей, потребителей, поскольку их сырье широко распространено в природе, они имеют относительно низкую стоимость и обладают рядом преимуществ по сравнению с белками животного происхождения. Препараты растительных белков (изоляты, концентраты) ограничено используются из-за относительно низкой функциональности, плохой растворимости и сложной структуры. К тому же, для белков характерно взаимодействие с клетчаткой, лигнином, гемицеллюлозами, что понижает их биодоступность и усвояемость. Наряду с традиционными соевыми белками и пшеничной клейковиной все больше начинают использоваться белки из альтернативных источников, таких как горох, нут, подсолнечник, чечевица и т. д. В обзоре освещены характеристики основных функциональных свойств белков, таких как водо- и жиросвязывающая способность, растворимость, жироземлюлирующие, пенообразующие, гелеобразующие свойства, способность их к текстурированию. Описаны факторы, влияющие на функциональные свойства растительных белков, включая природу и сорт культуры, методы экстракции, тепловую обработку и способы выделения из растворов. Современные знания о взаимосвязи между физико-химическими свойствами и структурно-молекулярными особенностями белков позволяют модифицировать их функциональные свойства. Это открывает возможности для улучшения и практического использования белков, а также для изменения их биологических и физиологических свойств, таких как усвояемость, иммуномоделирующая активность, антиоксидантная и антиаллергенная активности. Выбор способов модификации с учетом их достоинств и недостатков зависит от природы белков, от технологических факторов производства и от особенностей агрегатного состояния пищевых систем, в которых они используются. Химические, физические, физико-химические и ферментативные методы модификации растительных белков предназначаются для улучшения физико-химических показателей качества пищевых изделий, а также их органолептических свойств (запах, вкус, текстура и т. д.) и биологической ценности. На основе выявленных теоретических сведений по зависимости свойств и структурных особенностей белков от фенотипических и генотипических факторов возможна их модификация и регулирование для обеспечения надлежащих показателей качества белоксодержащих пищевых продуктов из различного вида растительного сырья.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCE

1. Мартинчик, А. Н., Маев, И. В., Янушевич, О. О. (2005). Общая нутрициология. М.: МЕДпресс-информ, 2005. [Martinchik, A. N., Maev, I. V., Yanushevich, O. O. (1985). General nutrition. Moscow: MEDpress-inform, 2005. (In Russian)]
2. Нечаев, А. П., Кочеткова, А. А., Колпакова, В. В., Траубенберг, С. Е., Витол, И. С., Кобелева, И. Б. и др. (2024). Пищевая химия. Санкт-Петербург: ГИОРД, 2024. [Nechaev, A. P., Kochetkova, A. A., Kolpakova, V. V., Traubenber, S. E., Vitol, I. S., Kobleleva, I. B. et al. (2024). Food chemistry. St. Petersburg: GIORD, 2024. (In Russian)]
3. Толстогузов, В. Б. (1987). Новые формы белковой пищи. М.: Агропромиздат, 1987. [Tolstoguzov V. B. (1987). New forms of protein food. Moscow: Agropromizdat, 1987. (In Russian)]
4. Kolpakova, V. V., Chumikina, L. V., Arabova, L. I., Lukin, D. N., Topunov, A. F., Titov, E. I. (2016). Functional technological properties and electrophoretic composition of modified wheat gluten. *Foods and Raw Materials*, 4(2), 48–57. <https://doi.org/10.21179/2308-4057-2016-2-48-57>
5. Moll, P., Grossmann, L., Kutzli, I., Weiss, J. (2019). Influence of energy density and viscosity on foam stability – A study with pea protein (*Pisum Sativum* L.). *Journal of Dispersion Science and Technology*, 41(12), 1789–1796. <https://doi.org/10.1080/01932691.2019.1635028>
6. Jakobson, K., Kaleda, A., Adra, K., Tammik, M. L., Vaikma, H., Kriščiunaite, T. et al. (2023). Techno-functional and sensory characterization of commercial plant protein powders. *Foods*, 12(14), Article 2895. <https://doi.org/10.3390/foods12142805>

7. Onder, S., Karaca, A. C., Ozcelik, B., Alamri, A. S., Ibrahim, S. A., Galanakis, C. M. (2023). Exploring the amino-acid composition, secondary structure, and physicochemical and functional properties of chickpea protein isolates. *ACS Omega*, 8(1), 1486–1495. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c06912>
8. Ma, W., Qi, B., Sami, R., Jiang, L., Li, Y., Wang, H. (2018). Conformational and functional properties of soybean proteins produced by extrusion-hydrolysis approach. *International Journal of Analytical Chemistry*, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2018/9182508>
9. Martinez-Velasco, A., Lobato-Calleros, C., Hernandez-Rodriguez, B. E., Roman-Guerrero, A., Alvarez-Ramirez, J., Vernon-Carter, E. J. High intensity ultrasound treatment of faba bean (*Vicia faba* L.) protein: Effect on surface properties, foaming ability and structural changes. *Ultrasonics — Sonochemistry*, 44, 97–105. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.02.007>
10. Tontul, I., Kasimoglu, Z., Asik, S., Atbakan, T., Topuz, A. (2017). Functional properties of chickpea protein isolates dried by refractance window drying. *International Journal of Biological Macromolecules*, 109, 1253–1259. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.11.135>
11. Kolpakova, V., Gaivoronskaya I., Gulakova V., Sarjeladze A. (July 2–8, 2018). *Composition on the basis of plantbased proteins with the use of transglutaminase*. 18 International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. Albena, Bulgaria, 2018. <https://doi.org/10.5593/sgem2018/6.2>
12. Yan, J., Zhao, S., Xu, X., Liu, F. (2023). Enhancing pea protein isolate functionality: A comparative study of high-pressure homogenization, ultrasonic treatment, and combined processing techniques. *Current Research in Nutrition and Food Science*, 8, Article 100653. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.1006512>
13. Shevkani, K., Singh, N., Chen, Y., Kaur, A., Yu, L. (2019). Pulse proteins: Secondary structure, functionality and applications. *Journal of Food Science and Technology*, 56(6), 2787–2798. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03723-8>
14. Shevkani, K., Singh, N., Kaur, A., Rana, J. C. (2015). Structural and functional characterization of kidney bean and field pea protein isolates: A comparative study. *Food Hydrocolloids*, 43, 679–689. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.07.024>
15. Karaca, A. C., Low, N., Nickerson, M. (2011). Emulsifying properties of chickpea, faba bean, lentil and pea proteins produced by isoelectric precipitation and salt extraction. *Food Research International*, 44(9), 2742–2750. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.06.012>
16. Колпакова, В. В., Фан, Ч. К., Гайворонская, И. С., Чумикина, Л. В. (2023). Свойства и структурные особенности белков нативных и модифицированных концентратов из белого и коричневого риса. *Пищевые системы*, 6(3), 317–328. [Kolpakova, V. V., Fan, Q. Ch., Gaivoronskaya, I. S., Chumikina, L. V. (2023). Properties and structural features of native and modified proteins of concentrates from white and brown rice. *Food Systems*, 6(3), 317–328. (In Russian)] <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-3-317-328>
17. Flory, J., Alavi, S. (2024). Use of hydration properties of proteins to understand their functionality and tailor texture of extruded plant-based meat analogues. *Journal of Food Science*, 89(1), 245–258. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16804>
18. Колпакова, В. В., Студенникова, О. Ю. (2009). Гидратационная способность и физико-химические свойства белков пшеничной клейковины. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, 2–3(308–309), 5–8. [Kolpakova, V. V., Studennikova, O. Yu. (2009). Hydration capacity and physico-chemical properties of wheat gluten proteins. *Izvestiya Vuzov. Food Technology*, 2–3(308–309), 5–8. (In Russian)]
19. Ванин, С. В., Колпакова, В. В. (2007). Функциональные свойства сухой пшеничной клейковины разного качества. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, 1(296), 21–24. [Vanin, S. V., Kolpakova, V. V. (2007). Functional properties of dry wheat gluten of different quality. *Izvestiya Vuzov. Food Technology*, 1(296), 21–24. (In Russian)]
20. Колпакова, В. В., Зайцева, Л. В., Мартынова, И. В., Осипов Е. А. (2007). Белок из пшеничных отрубей: повышение выхода и функциональные свойства. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 2, 23–25. [Kolpakova, V. V., Zaytseva, L. V., Martynova, I. V., Osipov Ye. A. (2007). Protein from wheaten bran: Increase of output and functional properties. *Storage and Processing of Farm Products*, 2, 23–25. (In Russian)]
21. Колпакова, В. В., Чумикина, Л. В., Арабова, Л. И. (2019). Модификация функциональных свойств белковых концентратов из белого и коричневого риса. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 81(1), 181–189. [Kolpakova, V. V., Chumikina, L. V., Arabova, L. I. (2019). Modification of functional properties of white and brown rice protein concentrates. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 81(1), 181–189. (In Russian)] <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2019-1-181-189>
22. Колпакова, В. В., Куликов, Д. С., Гулакова, В. А., Уланова, Р. В. (2023). Комплексная модификация картофельного сока с получением белковых препаратов. *Пищевая промышленность*, 9, 74–79. [Kolpakova, V. V., Kulikov, D. S., Gulakova, V. A., Ulanova, R. V. (2023). Obtaining protein preparations by complex modification of potato juice. *Food Industry*, 9, 74–79. (In Russian)] <https://doi.org/10.52653/PPI.2023.9.9.013>
23. O'Flynn, T. D., Hogan, S. A., Daly, D. F. M., O'Mahony, J. A., McCarthy, N. A. (2021). Rheological and solubility properties of soy protein isolate. *Molecules*, 26(10), Article 3015. <https://doi.org/10.3390/molecules26103015>
24. Lei, D., Li, J., Zhang, C., Li, S., Zhu, Z., Wang, F. et al. (2022). Complexation of soybean protein isolate with β -glucan and myricetin: Different affinity on 7S and 11S globulin by QCM-D and molecular simulation analysis. *Food Chemistry*: X, 15, Article 100426. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100426>
25. Kolpakova, V. V., Lukin, N. D., Gaivoronskaya, I. S. (2018). Interrelation of functional properties of protein products from wheat with the composition and physicochemical characteristics of their proteins. Chapter in a book: *Global Wheat Production*. London: IntechOpen, 2018. <http://doi.org/10.5772/intechopen.75803>
26. Колпакова, В. В., Уланова, Р. В., Куликов, Д. С., Гулакова, В. А., Семёнов, Г. В., Шевякова, Л. В. (2022). Показатели качества гороховых и нутовых белковых концентратов. *Техника и технология пищевых производств*, 52(4), 650–664. [Kolpakova, V. V., Ulanova, R. V., Kulikov, D. S., Gulakova, V. A., Semenov, G. V., Shevyakova, L. V. (2022). Pea and chickpea protein concentrates: Quality indicators. *Food Processing: Techniques and Technology*, 52(4), 650–664. (In Russian)] <http://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-4-2394>
27. Rashwan, A. K., Osman, A. I., Abdelshafy, A. M., Mo, J., Chen, W. (2023). Plant-based proteins: Advanced extraction technologies, interactions, physicochemical and functional properties, food and related applications, and health benefits. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1–28. <http://doi.org/10.1080/10408398.2023.2279696>
28. Huang, L., Ding, X., Dai, C., Ma, H. (2017). Changes in the structure and dissociation of soybean protein isolate induced by ultrasound-assisted acid pretreatment. *Food Chemistry*, 232, 727–732. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.077>
29. Lu, Z. X., He, J. F., Zhang, Y. C., Bing, D. J. (2020). Composition, physicochemical properties of pea protein and its application in functional foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(15), 2593–2605. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1651248>
30. Singhal, A., Karaca, A. C., Tyler, R., Nickerson, M. (2016). Pulse Proteins: From processing to structure-function relationships. Chapter in a book: *Grain Legumes*. London: IntechOpen, 2016. <https://doi.org/10.5772/64020>
31. Stone, A. K., Karalash, A., Tyler, R. T., Warkentin, T. D., Nickerson, M. T. (2015). Functional attributes of pea protein isolates prepared using different extraction methods and cultivars. *Food Research International*, 76, 31–38. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.11.017>
32. Gültekin Subaşı, B., Vahapoğlu, B., Capanoglu, E., Mohammadifar, M. A. (2022). A review on protein extracts from sunflower cake: Techno-functional properties and promising modification methods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(24), 6682–6697. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1904821>
33. Le Priol, L., Dagmey, A., Morandat, S., Saleh, K., El Kirat, K., Nesterenko, A. (2019). Comparative study of plant protein extracts as wall materials for the improvement of the oxidative stability of sunflower oil by microencapsulation. *Food Hydrocolloids*, 95(2), 105–115. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.04.026>
34. Albe Slabi, S., Mathe, C., Basselin, M., Framboisier, X., Ndiaye, M., Galet, O. et al. (2020). Multi-objective optimization of solid/liquid extraction of total sunflower proteins from cold press meal. *Food Chemistry*, 317, Article 126423. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126423>
35. Malik, M. A., Saini, C. S. (2017). Polyphenol removal from sunflower seed and kernel: Effect on functional and rheological properties of protein isolates. *Food Hydrocolloids*, 63, 705–715. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.10.026>
36. Alexandrino, T. D., Ferrari, R. A., de Oliveira, L. M., de Cássia, S. C. Ormenese, R., Pacheco, M. T. B. (2017). Fractioning of the sunflower flour components: Physical, chemical and nutritional evaluation of the fractions. *LWT*, 84, 426–432. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.05.062>
37. Shen, Y., Tang, X., Li, Y. (2021). Drying methods affect physicochemical and functional properties of quinoa protein isolate. *Food Chemistry*, 339, Article 127823. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127823>
38. Osen, R., Toelstede, S., Wild, F., Eisner, P., Schweiggert-Weisz, U. (2014). High moisture extrusion cooking of pea protein isolates: Raw material characteristics, extruder responses, and texture properties. *Journal of Food Engineering*, 127, 67–74. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.11.023>
39. Pietrysiak, E., Smith, D. M., Smith, B. M., Ganjyal, G. M. (2018). Enhanced functionality of pea-rice protein isolate blends through direct steam injection processing. *Food Chemistry*, 243, 338–344. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.09.132>
40. Ma, K. K., Greis, M., Lu, J., Nolden, A. A., McClements, D. I., Kinchla, A. J. (2022). Functional performance of plant proteins. *Foods*, 11(4), Article 594. <https://doi.org/10.3390/foods11040594>
41. Lafarga, T., Álvarez, C., Villaró, S., Bobo, G., Aguiló-Aguayo, I. (2019). Potential of pulse-derived proteins for developing novel vegan edible foams and emulsions. *International Journal of Food Science and Technology*, 55(2), 475–481. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14286>
42. Gundogan, R., Can Karaca, A. (2020). Physicochemical and functional properties of proteins isolated from local beans of Turkey. *LWT*, 130, Article 109609. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109609>
43. Keskin, S. O., Ali, T. M., Ahmed, J., Shaikh, M., Siddiq, M., Uebersax, M. A. (2021). Physico-chemical and functional properties of legume protein, starch, and dietary fiber—A review. *Legume Science*, 4(1), Article e117. <https://doi.org/10.1002/leg3.117>
44. Pasupuleti, V. K., Braun, S. (2010). State of the art manufacturing of protein hydrolysates. Chapter in a book: *Protein Hydrolysates in Biotechnology*. Springer Dordrecht, 2010. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6674-0_2
45. Jeong, M.-S., Cho, S.-J. (2024). Effect of pH-shifting on the water holding capacity and gelation properties of mung bean protein isolate. *Food Research International*, 177, Article 113912. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113912>
46. Ramani, A., Kushwaha, R., Malaviya, R., Kumar, R., Yadav, N. (2021). Molecular, functional and nutritional properties of chickpea (*Cicer arietinum* L.) protein isolates prepared by modified solubilization methods. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15(3), 2352–2368. <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00778-6>
47. Brayden, M., L. Xu, G., Barbay, G., Koros, W. (March 26–30, 2017). *Impact of impurities on carbon molecular sieve membranes for applications in olefins units*. Spring Meeting and 13th Global Congress on Process Safety. Henry Gonzalez Convention Center, San Antonio, 2017.
48. Adebisi, A. P., Aluko, R. E. (2011). Functional properties of protein fractions obtained from commercial yellow field pea (*Pisum sativum* L.) seed protein isolate. *Food Chemistry*, 128(4), 902–908. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.03.116>
49. Vélez-Erazo, E. M., Silva, I. L., Comunian, T., Kurozawa, L. E., Hubinger, M. D. (2021). Effect of chia oil and pea protein content on stability of emulsions obtained by ultrasound and powder production by spray drying. *Journal of Food Science and Technology*, 58(10), 3765–3779. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04834-3>

50. Houde, M., Khodaei, N., Benkerroum, N., Karboune, S. (2018). Barley protein concentrates: Extraction, structural and functional properties. *Food Chemistry*, 254, 367–376. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.01.156>
51. Olagunju, A. I., Omoba, O. S., Enujiugha, V. N., Alashi, A. M., Aluko, R. E. (2018). Antioxidant properties, ACE/renin inhibitory activities of pigeon pea hydrolysates and effects on systolic blood pressure of spontaneously hypertensive rats. *Food Science and Nutrition*, 6(7), 1879–1889. <https://doi.org/10.1002/fsn3.740>
52. Lam, A. C. Y., Can Karaca, A., Tyler, R. T., Nickerson, M. T. (2018). Pea protein isolates: Structure, extraction, and functionality. *Food Reviews International*, 34(2), 126–147. <https://doi.org/10.1080/87559129.2016.1242135>
53. Lobanov, V. G., Slepokurova, Y. I., Zharkova, I. M., Koleva, T. N., Roslyakov, Y. F., Krasteva, A. P. (2018). Economic effect of innovative flour-based functional foods production. *Foods and Raw Materials*, 6(2), 474–482. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2018-2-474-482>
54. Akter, D., Begum, R., Rahman, Md. N., Talukder, N., Alam, J. (2020). Optimization of extraction process parameter for rice bran protein concentrate and its utilization in high protein biscuit formulation. *Current Research in Nutrition and Food Science*, 8(2), 596–608. <https://doi.org/10.12944/CRNFSJ.8.2.25>
55. Higa, F., House, J. D., Nickerson, M. T. (2023). Functionality and nutritional properties of yellow pea, green lentil, chickpea, and navy bean proteins extracted by different methods. *European Food Research and Technology*, 250(1), 273–286. <https://doi.org/10.1007/s00217-023-04385-9>
56. Bajaj, P. R., Bhunia, K., Kleiner, L., Joyner (Melito), H. S., Smith, D., Ganjyal, G. et al. (2017). Improving functional properties of pea protein isolate for microencapsulation of flaxseed oil. *Journal of Microencapsulation*, 34(2), 218–230. <https://doi.org/10.1080/02652048.2017.1517045>
57. Messian, J.-L., Chihhi, M. L., Sok N., Saurel, R. (2015). Effect of globular pea proteins fractionation on their heat-induced aggregation and acid cold-set gelation. *Food Hydrocolloids*, 46, 235–243. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.11.025>
58. Sun, X. D., Arntfield, S. D. (2011). Gelation properties of salt-extracted pea protein isolate induced by heat treatment: Effect of heating and cooling rate. *Food Chemistry*, 124(3), 1011–1016. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.07.063>
59. Moreno, H. M., Domínguez-Timón, F., Díaz, M. T., Pedrosa, M. M., Borderías, A. J., Tovar, C. A. (2020). Evaluation of gels made with different commercial pea protein isolates: Rheological, structural and functional properties. *Food Hydrocolloids*, 99(4), Article 105375. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105375>
60. Knopfe, C., Shwenke, K. D., Mothes, R., Mikheeva, L. M., Grinberg, V., Görnitz, E. et al. (1998). Acetylation and succinylation of faba bean legumin: Modification of hydrophobicity and conformation. *Food/Nahrung*, 42(03–04), 194–196.
61. Shih, F. F., Hamada, J. S., Marshall, W. E. (1999). Deamidation and phosphorylation to improve protein functionality in foods. Chapter in a book: Molecular approaches to improving food quality and safety. Springer New York, NY, 1999. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-8070-2_2
62. Fang, L., Xiang, H., Sun-Waterhouse, D., Cui, C., Lin, J. (2020). Enhancing the usability of pea protein isolate in food applications through modifying its structural and sensory properties via deamidation by glutaminase. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68 (6), 1691–1697. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b06046>
63. Gallart-Palau, X., Serra, A., Sze, S. K. (2015). Uncovering neurodegenerative protein modifications via proteomic profiling. Chapter in a book: International Review of Neurobiology. Academic Press, 2015. <https://doi.org/10.1016/bs.im.2015.06.002>
64. Schwenke, K. D., Mothes, R., Dudek, S., Görnitz, E. (2000). Phosphorylation of the 12S globulin from rapeseed (*Brassica napus* L.) by phosphorous oxychloride: Chemical and conformational aspects. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(3), 708–715. <https://doi.org/10.1021/jf9907900>
65. Liu, Y., Wang, D., Wang, J., Yang, Y., Zhang, L., Li, J., et al. (2019). Functional properties and structural characteristics of phosphorylated pea protein isolate. *International Journal of Food Science and Technology*. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14391>
66. Nikbakht Nasrabadi, M., Sedaghat Doost, A., Mezzenga, R. (2021). Modification approaches of plant-based proteins to improve their techno-functionality and use in food products. *Food Hydrocolloids*, 118, Article 106789. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106789>
67. Ma, W., Wang, T., Wang, J., Wu, D., Wu, C., Du, M. (2020). Enhancing the thermal stability of soy proteins by preheat treatment at lower protein concentration. *Food Chemistry*, 306, Article 125593. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125593>
68. Zhao, M., Xiong, W., Chen, B., Zhu, J., Wang, L. (2020). Enhancing the solubility and foam ability of rice glutelin by heat treatment at pH12: Insight into protein structure. *Food Hydrocolloids*, 103, Article 105626. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105626>
69. Mir, N. A., Riar, C. S., Singh, S. (2020). Cstructural modification in album (Chenopodium album) protein isolates due to controlled thermal modification and its relationship with protein digestibility and its relationship with protein digestibility and functionality. *Food Hydrocolloids*, 103, Article 105708. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105708>
70. Bühler, J. M., Dekkers, B. L., Bruins, M. E., van der Goot, A. J. (2020). Modifying faba bean protein concentrate using dry heat to increase water holding capacity. *Foods*, 9(8), Article 1077. <https://doi.org/10.3390/foods9081077>
71. Ling, B., Cheng, T., Wang, S. (2019). Recent developments in applications of radio frequency heating for improving safety and quality of food grains and their products: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(15), 2622–2642. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1651690>
72. Guo, C., Wang, X., Wang, Y. (2018). Dielectric properties of soy protein isolate dispersion and its temperature profile during radio frequency heating. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(7), Article e13659. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13659>
73. Ling, B., Ouyang, S., Wang, S. (2019). Effect of radio frequency treatment on functional, structural and thermal behaviors of protein isolates in rice bran. *Food Chemistry*, 289, 537–544. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.072>
74. Hassan, A. B., von Hoersten, D., Mohamed Ahmed, I. A. (2019). Effect of radio frequency heat treatment on protein profile and functional properties of maize grain. *Food Chemistry*, 271, 142–147. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.190>
75. Moll, P., Salminen, H., Schmitt, C., Weiss, J. (2021). Impact of microfluidization on colloidal properties of insoluble pea protein fractions. *European Food Research and Technology*, 247(3), 545–554. <https://doi.org/10.1007/s00217-020-03629-2>
76. Vall-Ilosera, M., Jessen, F., Henriet, P., Marie, R., Jahromi, M., Sloth, J. J. (2021). Physical stability and interfacial properties of oil in water emulsion stabilized with pea protein and fish skin gelatin. *Food Biophysics*, 16(1), 139–151. <https://doi.org/10.1007/s11483-020-09655-7>
77. Asif, M. N., Imran, M., Ahmad, M. H., Khan M. K., Hailu, G. G. (2024). Physicochemical and functional properties of *Moringa* seed protein treated with ultrasound. *ACS Omega*, 9(3), 4102–4110. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c09323>
78. Yao, G., Guo, Y., Cheng, T., Wang, Z., Li, B., Xia, C. et al. (2022). Effect of γ -irradiation on the physicochemical and functional properties of rice protein. *Food Science and Technology (Campinas)*, 42(1), Article e12422. <http://dx.doi.org/10.1590/fst.12422>
79. Helmick, H., Rodriguez, N., Kokini, J. L. (2023). Utilization of creep ringing and bioinformatic modelling in study of cold denatured pea protein emulsions. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 88, Article 103420. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103420>
80. Zhang, Z., Zhang, L., He, S., Li, X., Jin, R., Liu, Q. et al. (2023). High-moisture extrusion technology application in the processing of textured plant protein meat analogues: A review. *Food Reviews International*, 39(8), 4873–4908. <http://doi.org/10.1080/87559129.2021.2024223>
81. Meng, X.-Y., Zhu, X.-Q., An, H.-Z., Yang, J.-F., Dai, H.-H. (2023). Study on the relationship between raw material characteristics of soybean protein concentrate and textured vegetable protein quality. *Food Science Technology (Campinas)*, 43(2), Article e121822. <https://doi.org/10.1590/fst.121822>
82. Kyriakopoulou, K., Dekkers, B., van der Goot, A. J. (2019). Plant-based meat analogues. Chapter in a book: Sustainable Meat Production and Processing, Cambridge: Academic Press, 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-814874-7.00006-7>
83. Liu, Y., Huang, Z.-H., Hu, Z.-X., Yu, Z., An, H.-Z. (2022). Texture and rehydration properties of texturized soy protein: analysis based on soybean 7S and 11S proteins. *International Journal of Food Science and Technology*, 58(1), 323–333. <https://doi.org/10.1111/ijfs.15787>
84. Samard, S., Ryu, G.-H. (2019). Physicochemical and functional characteristics of plant protein-based meat analogs. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(2), Article 14123. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14123>
85. Semenova, M. (2017). Protein-polysaccharide associative interactions in the design of tailor-made colloidal particles. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 28, 15–21. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2016.12.003>
86. Liu, S., Low, N. H., Nickerson, M. T. (2009). Effect of pH, salt, and biopolymer ratio on the formation of pea protein isolate-gum Arabic complexes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(4), 1521–1506. <https://doi.org/10.1021/jf802645n>
87. Klemmer, K. J., Waldner, L., Stone, A., Low, N. H., Nickerson, M. T. T. (2012). Complex coacervation of pea protein isolate and alginate polysaccharides. *Food Chemistry*, 130(3), 710–715. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.07.114>
88. Lan, Y., Chen, B., Rao, J. (2018). Pea protein isolate–high methoxyl pectin soluble complexes for improving pea protein functionality: Effect of pH, biopolymer ratio and concentrations. *Food Hydrocolloids*, 80, 245–253. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.02.021>
89. Yekta, R., Assadpour, E., Hosseini, H., Jafari, S. M. (2023). The influence of ionic polysaccharides on the physicochemical and techno-functional properties of soy proteins; a comprehensive review. *Carbohydrate Polymers*, 319, Article 121191. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121191>
90. Silva, F. G., Passerini, A. B. S., Ozorio, L., Picone, C. S. F., Perrechil, F. A. (2024). Interactions between pea protein and gellan gum for the development of plant-based structures. *International Journal of Biological Macromolecules*, 255, Article 128113. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128113>
91. Lopes-da-Silva, J. A., Monteiro, S. R. (2019). Gelling and emulsifying properties of soy protein hydrolysates in the presence of a neutral polysaccharide. *Food Chemistry*, 294, 216–223. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.05.039>
92. Beniwal, A. S., Singh, J., Kaur, L., Hardacre, A., Singh, H. (2021). Meat analogs: Protein restructuring during thermomechanical processing. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(2), 1221–1249. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12721>
93. Florowska, A., Hilal, A., Florowski, T., Wroniak, M. (2020). Addition of selected plant-derived proteins as modifiers of inulin hydrogels properties. *Foods*, 9(7), Article 845. <https://doi.org/10.3390/foods9070845>
94. Salles, J., Gueugneau, M., Patrac, V., Malnero-Fernandez, C., Guillet, C., Le Bacquer, O. et al. (2023). Associating inulin with a pea protein improves fast-twitch skeletal muscle mass and muscle mitochondrial activities in old rats. *Nutrients*, 15(17), Article 3766. <https://doi.org/10.3390/nu15173766>
95. Maumela, P., van Rensburg, E., Chimphango, A. F. A., Görgens, J. F. (2020). Sequential extraction of protein and inulin from the tubers of *Jerusalem artichoke* (*Helianthus tuberosus* L.). *Journal of Food Science and Technology*, 57(2), 775–786. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-04110-z>
96. Strasser, R. (2016). Plant protein glycosylation. *Glycobiology*, 26(9), 926–939. <https://doi.org/10.1093/glycob/cww025>
97. Zhao, C., Yin, H., Yan, J., Qi, B., Liu, J. (2020). Structural and physicochemical properties of soya bean protein isolate/maltodextrin mixture and glycosylation conjugates. *International Journal of Food Science and Technology*, 55(10), 3315–3326. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14595>
98. Abe, R., Matsukaze, N., Kobayashi, H., Yamaguchi, Y., Uto-Kondo, H., Kumagai, H. et al. (2020). Allergenicity of deamidated and/or peptide-bond-hydrolyzed wheat gliadin by transdermal administration. *Foods*, 9(5), Article 635. <https://doi.org/10.3390/foods9050635>
99. Klost, M., Drusch, S. (2019). Functionalisation of pea protein by tryptic hydrolysis — characterisation of interfacial and functional properties. *Food Hydrocolloids*, 86(1), 134–140. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.03.013>

100. Brückner-Gühmann, M., Heiden-Hecht, T., Sözer, N., Drusch, S. (2018). Foaming characteristics of oat protein and modification by partial hydrolysis. *European Food Research and Technology*, 244(12), 2095–2106. <https://doi.org/10.1007/s00217-018-3118-0>
101. Tamm, F., Herbst, S., Brodtkorb, A., Drusch, S. (2016). Functional properties of pea protein hydrolysates in emulsions and spray-dried microcapsules. *Food Hydrocolloids*, 58, 204–214. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.02.032>
102. García Arteaga, V., Apéstegui Guardia, M., Muranyi, I., Eisner, P., Schweiggert-Weisz, U. (2020). Effect of enzymatic hydrolysis on molecular weight distribution, techno-functional properties and sensory perception of pea protein isolates. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 65, Article 102449. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102449>
103. Eckert, E., Han, J., Swallow, K., Tian, Z., Jarpa-Parra, M., Chen, L. (2019). Effects of enzymatic hydrolysis and ultrafiltration on physicochemical and functional properties of faba bean protein. *Cereal Chemistry*, 96(4), 725–741. <https://doi.org/10.1002/cche.10169>
104. Barać, M., Čabrilo, S., Pešić, M., Stanojević, S., Pavličević, M., Mačej, O. et al. (2011). Functional properties of pea (*Pisum sativum*, L.) protein isolates modified with chymosin. *International Journal of Molecular Sciences*, 12(12), 8372–8387. <https://doi.org/10.3390/ijms12128372>
105. Лозовский, И. В. Орлова, Т. В. (13–15 июля 2022). Модификация функциональных свойств белков гороха (*Pisum sativum* L.). Сборник докладов IV Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы научно-инновационного обеспечения агропромышленного комплекса регионов». Курск, 2022. [Lozovsky, I. V. Orlova, T. V. (June 13–15, 2022). Modification of functional properties of pea (*Pisum sativum* L.) proteins. Proceedings of the 4th International scientific-practical conference “Problems and prospects of scientific innovative provision of the agro-industrial complex of regions”. Kursk, 2022. (In Russian)]
106. Cruz-Chamorro, I., Santos-Sánchez, G., Álvarez-López, A. I., Pedroche, J., Lardone, P. J., Arnoldi, A. et al. (2023). Pleiotropic biological effects of *Lupinus* spp. protein hydrolysates. *Trends in Food Science and Technology*, 133, 244–266. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.02.011>
107. Esfandi, R., Willmore, W. G., Tsopmo, A. (2019). Peptidomic analysis of hydrolyzed oat bran proteins and their in vitro antioxidant and metal chelating properties. *Food Chemistry*, 279, 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.11.110>
108. Chen, L., Chen, J., Yu, L., Wu, K., Zhao, M. (2018). Emulsification performance and interfacial properties of enzymatically hydrolyzed peanut protein isolate pretreated by extrusion cooking. *Food Hydrocolloids*, 77, 607–616. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.11.002>
109. Schlegel, K., Leidigkeit, A., Eisner, P., Schweiggert-Weisz, U. (2019). Techno-functional and sensory properties of fermented lupin protein isolates. *Foods*, 8(12), Article 678. <https://doi.org/10.3390/foods8120678>
110. Балабан, Н. П., Шарипова, М. Р. (2011). Практическое применение бактериальных протеаз. Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. 153(2), 29–40. [Balaban, N. P., Sharipova, M. R. (2011). Practical application of bacilli proteases. *Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series*, 153(2), 29–40. (In Russian)]
111. Колпакова, В. В., Чумикина, Л. В., Васильев, А. В., Арапова, Л. И., Топунов, А. Ф. (2011). Особенности действия эндо- и экзопроteinазных ферментных препаратов на белки пшеничной клейковины. *Биотехнология*, 3, 63–73. [Kolpakova, V. V., Chumikina, L. V., Vasiliev, A. V., Arabova, L. I., Topunov, A. F. (2011). A special effect of endo- and exoproteinase enzyme preparations on wheat gluten proteins. *Biotechnologiya*, 3, 63–73. (In Russian)]
112. Felix, M., Cermeño, M., FitzGerald, R. J. (2020). Influence of hydrolysis on the bioactive properties and stability of chickpea-protein-based o/w emulsions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(37), 10118–10127. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c02427>
113. Liu, X., Wang, C., Zhang, X., Zhang, G., Zhou, J., Chen, J. (2022). Application prospect of protein-glutaminase in the development of plant-based protein. *Foods*, 11(3), Article 440. <https://doi.org/10.3390/foods11030440>
114. Zheng, N., Long, M., Zhang, Z., Zan, Q., Osire, T., Zhou, H. et al. (2022). Protein-glutaminase engineering based on isothermal compressibility perturbation for enhanced modification of soy protein isolate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(43), 13969–13978. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c06063>
115. Qu, R., Zhu, X., Tian, M., Liu, Y., Yan, W., Ye, J. et al. (2018). Complete genome sequence and characterization of a protein-glutaminase producing strain, *Chryseobacterium proteolyticum* QSH1265. *Frontiers in Microbiology*, 9, Article 1975. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01975>
116. Amobonye, A., Singh, S., Pillai, S. (2019). Recent advances in microbial glutaminase production and applications—a concise review. *Critical Reviews in Biotechnology*, 39(7), 944–963. <https://doi.org/10.1080/07388551.2019.1640659>
117. Kumagai, H., Urade, R. (2019). Deamidation of gluten proteins as a tool for improving the properties of bread. Chapter in a book: Flour and breads and their fortification in health and disease prevention. Academic Press, 2019. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814639-2.00001-0>
118. Chen, X., Fu, W., Luo, Y., Cui, C., Suppavorasatit, I., Liang, L. (2021). Protein deamidation to produce processable ingredients and engineered colloids for emerging food applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(4), 3788–3817. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12759>
119. Moreno, H. M., Tovar, C. A., Domínguez-Timón, F., Cano-Báez, J., Díaz, M. T., Pedrosa, M. M. et al. (2020). Gelation of commercial pea protein isolate: Effect of microbial transglutaminase and thermal processing. *Food Science and Technology (Campinas)*, 40(4), 800–809. <http://dx.doi.org/10.1590/fst.19519>
120. Yaputri, B. P., Feyzi, S., Ismail, B. P. (2023). Transglutaminase-induced polymerization of pea and chickpea protein to enhance functionality. *Gels*, 10(1), Article 11. <http://dx.doi.org/10.3390/gels10010011>
121. Masiá, C., Ong, L., Logan, A., Stockmann, R., Gambetta, J., Jensen, P. et al. (2023). Enhancing the textural and rheological properties of fermentation-induced pea protein emulsion gels with transglutaminase. *Soft Matter*, 20(1), 133–143. <https://doi.org/10.1039/D3SM01001E>
122. Zhang, J., Li, T., Chen, Q., Liu, H., Kaplan, D. L., Wang, Q. (2023). Application of transglutaminase modifications for improving protein fibrous structures from different sources by high-moisture extruding. *Food Research International*, 166(2), Article 112623. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112623>
123. Redd, A. J., Pike, O. A., Ahlborn, G. J. (2023). Effects of microbial transglutaminase on gluten-free sourdough bread structure and loaf characteristics. *Journal of Cereal Science*, 115(10), Article 103833. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2023.103833>
124. Shen, Y., Hong, S., Li, Y. (2022). Pea protein composition, functionality, modification, and food applications: A review. *Advances in Food and Nutrition Research*, 101, 71–127. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2022.02.002>
125. Fernández Sosa, E. I., Chaves, M. G., Quiroga, A. V., Avanza, M. V. (2021). Comparative study of structural and physicochemical properties of pigeon pea (*Cajanus cajan* L.) protein isolates and its major protein fractions. *Plant Foods for Human Nutrition*, 76(1), 37–45. <https://doi.org/10.1007/s11130-020-00871-7>
126. Lei, D., Li, J., Zhang, C., Li, S., Zhu, Z., Wang, F. et al. (2022). Complexation of soybean protein isolate with β -glucan and myricetin: Different affinity on 7S and 11S globulin by QCM-D and molecular simulation analysis. *Food Chemistry*, 15(3), Article 100426. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.100426>
127. Feng, X., Wu, X., Gao, T., Geng, M., Teng, F., Li, Y. (2024). Revealing the interaction mechanism and emulsion properties of carboxymethyl cellulose on soy protein isolate at different pH. *Food Hydrocolloids*, 150(4), Article 109739. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.109739>
128. Soto-Madrid, D., Pérez, N., Gutiérrez-Cutiño, M., Matiaevich, S., Zúñiga, R. N. (2023). Structural and physicochemical characterization of extracted proteins fractions from chickpea (*Cicer arietinum* L.) as a potential food ingredient to replace ovalbumin in foams and emulsions. *Polymers*, 1(15), Article 110. <https://doi.org/10.3390/polym15010110>
129. Chang, L., Lan, Y., Bandillo, N., Ohm, J.-B., Chen, B., Rao, J. (2021). Plant proteins from green pea and chickpea: Extraction, fractionation, structural characterization and functional properties. *Food Hydrocolloids*, 123(20), Article 107165. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107165>
130. Verkempinck, S. H. E., Duijsens, D., Mukherjee, A., Wilde, P. J. (2024). Pea protein extraction method impacts the protein (micro)structural organisation and in vitro digestion kinetics. *Food and Function*, 15(20), 953–966. <https://doi.org/10.1039/D3FO04225A>
131. GopikaJayaprakash, Chawla, P., Sridhar, K., Bains, A. (2023). Interactions of legume phenols-rice protein concentrate towards improving vegan food quality: Development of a protein-phenols enriched fruit smoothie. *Food Research International*, 171(1), Article 113075. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113075>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ		AUTHOR INFORMATION	
Принадлежность к организации		Affiliation	
Колпакова Валентина Васильевна — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий отделом биотехнологии комплексной переработки крахмалсодержащего сырья, Всероссийский научно-исследовательский институт крахмала и переработки крахмалсодержащего сырья — филиал Федерального исследовательского центра картофеля имени А. Г. Лорха 140051, Московская область, Люберцы, п. Красково, ул. Некрасова, 11 Тел.: + 7-915-285-84-50 E-mail: Val-kolpakova@rambler.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7288-8569 * автор для контактов		Valentina V. Kolpakova , Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, Head of the Department of Biotechnology for the Complex Processing of Starch-Containing Raw Materials, All-Russian Research Institute of Starch and Starch-containing Raw Materials Processing — Branch of Russian Potato Research Centre 11, Nekrasov Str., 140051, Kraskovo, Lyubertsy, Moscow region, Russia Tel.: + 7-915-285-84-50 E-mail: Val-kolpakova@rambler.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7288-8569 * corresponding author	
Бызов Василий Аркадьевич – кандидат сельскохозяйственных наук, директор, Всероссийский научно-исследовательский институт крахмала и переработки крахмалсодержащего сырья — филиал Федерального исследовательского центра картофеля имени А. Г. Лорха 140051, Московская область, Люберцы, п. Красково, ул. Некрасова, 11 Тел.: + 7-977-714-64-80 E-mail: byzov1966@yandex.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1918-4455		Vasily A Byzov , Candidate of Agricultural Sciences, Director, All-Russian Research Institute of Starch and Starch-containing Raw Materials Processing — Branch of Russian Potato Research Centre 11, Nekrasov Str., 140051, Kraskovo, Lyubertsy, Moscow region, Russia Tel.: + 7-915-285-84-50 E-mail: Val-kolpakova@rambler.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7288-8569	
Критерии авторства		Contribution	
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.		The author has the sole responsibility for writing the manuscript and is responsible for plagiarism.	
Конфликт интересов		Conflict of interest	
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.		The authors declare no conflict of interest.	