Химия растительного сырья. 2024. №4. С. 5–23.
Khimiya rastitel'nogo syr'ya, 2024, no. 4, pp. 5–23.
DOI: 10.14258/jcprm.20240413599

Обзоры

УДК 664

ВЛИЯНИЕ ДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКА НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА РАСТИТЕЛЬНЫХ БЕЛКОВ. ОБЗОР ПРЕДМЕТНОГО ПОЛЯ

© ***Л.Ч. Бурак*, А.Н. Сапач***

ООО «БЕЛРОСАКВА», ул. Пономаренко, 35А, Минск, 220015, Республика Беларусь, leonidburak@gmail.com

Введение. В связи с возросшим интересом потребителей к вегетарианству в центре внимания научного сообщества оказались растительные белки, исследования которых направлены на улучшение их питательных и функциональных свойств. Цель статьи – обзор результатов научных исследований о влиянии ультразвуковой технологии на физико-химические и функциональные свойства растительных белков.

Материалы и методы. Поиск научной литературы на английском и русском языке по исследованию влияния ультразвуковых технологий на физико-химические и функциональные свойства растительных белков проводили в библиографических базах «Scopus», «Web of Science», а также других источниках. В качестве временных рамок для обзора научных публикаций принят период 2010–2023 гг. При выполнении работы использованы научные методы поиск и скрининг научной литературы, извлечение данных, их анализ, систематизации и обобщения.

Результаты и их обсуждение. Результаты многочисленных научных исследований показали, что ультразвук способен вызывать значительные изменения в растительных белках, включая денатурацию и модификацию их структур. Эти модификации могут привести к улучшению функциональных свойств белков, таких как влагоудерживающая способность, растворимость и вязкость. Технология высокоинтенсивного ультразвука открывает большие перспективы для модификации физико-химических свойств растительных белков. Этот метод предлагает такие преимущества, как энергоэффективность, более короткое время обработки и сокращение или исключение использования органических растворителей. Вместе с тем применение ультразвука высокой интенсивности при обработке растительных белков имеет и определенные недостатки, включая денатурацию белков, необходимость в специализированном оборудовании и ограничения в широком промышленном использовании.

Выводы. Ультразвук является перспективной технологией модификации растительных белков, открывающей новые возможности для разработки инновационных пищевых ингредиентов и продуктов питания. Материалы данного научного обзора могут быть использованы для дальнейших исследований и практического применения ультразвука в пищевой промышленности, в целях эффективного использования растительных белков.

Ключевые слова: растительный белок, модификация, ультразвук, функциональные свойства, вязкость, растворимость, гидрофобность, денатурация, вторичная структура.

Для цитирования: Бурак Л.Ч., Сапач А.Н. Влияние действия ультразвука на функциональные свойства растительных белков. Обзор предметного поля // Химия растительного сырья. 2024. №4. С. 5–23. DOI: 10.14258/jcprm.20240413599.

Введение

Последнее десятилетие характеризуется значительным ростом потребителей, которые являются сторонниками вегетарианской и веганской диеты, заботящихся о своем здоровье и снижении вредного воздействия производства продуктов питания на окружающую среду. Белки оказывают значительное влияние на пищевую ценность и функциональные свойства продуктов [1]. Вместе с тем получение в достаточном количестве белков растительного происхождения, которые по своей пищевой ценности могли бы полностью заменить белки животного происхождения, остается проблемой. В результате этого растет интерес научного сообщества к растительным белкам и стратегиям по улучшению их питательных и функциональных свойств [2, 3]. Функциональные свойства белков изолятов можно модифицировать с помощью физических, химических и ферментативных методов обработки. Одним из основных перспективных физических методов модификации растительных белков, применяемых в ходе научных исследований и практического использования, является ультразвуковой метод. Этот метод включает применение высокочастотных ультразвуковых волн к белковым

* Автор, с которым следует вести переписку.

растворам с целью стимулирования денатурации, гидролиза и конформационной модификации белка. По сравнению с традиционными термическими методами в пищевой промышленности ультразвукой технологии высокой интенсивности (частота: 20–100 кГц, мощность: 10–1000 Вт/см^2) уделяется особое внимание из-за более высокого выхода продукции, сохранения качества и функциональности обработанных пищевых продуктов, а также простоты в эксплуатации оборудования и безопасности для окружающей среды [4–6].

Одним из основных преимуществ ультразвука высокой интенсивности при модификации белков является его способность улучшать функциональность белков в пищевых продуктах. Например, ультразвук можно использовать для повышения растворимости белков, улучшения эмульгирования и стабилизации пищевых систем, а также улучшения вязкости и текстуры пищевых продуктов [5, 7]. Кроме того, ультразвук высокой интенсивности можно использовать для ускорения ферментативного гидролиза белков, который способен генерировать биоактивные пептиды, оказывающие положительное влияние на здоровье [8, 9].

Цель данного обзора – представить современное состояние применения ультразвука высокой интенсивности как зеленой, экологичной технологии, используемой для модификации реологических свойств растительных белков с целью использования в пищевой промышленности.

Материалы и методы

Поиск научной литературы на английском языке по исследованию влияния ультразвуковых технологий на физико-химические и функциональные свойства растительных белков проводили в библиографических базах «Scopus», «Web of Science» и «PubMed». Для отбора научных статей на русском языке провели поиск по ключевым словам в «Google Scholar» и «Научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU».

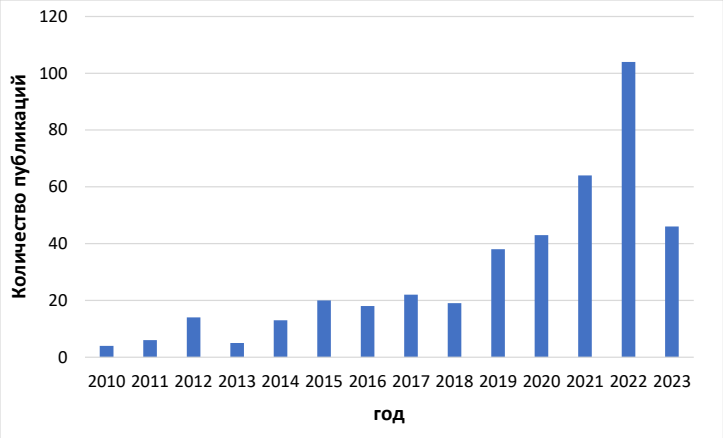
В качестве временных рамок для обзора научных публикаций принят период 2010–2023 гг. При выполнении работы использованы научные методы, такие как поиск и скрининг научной литературы, извлечение данных, их анализ, систематизации и обобщения. При отборе публикаций для обзора приоритет отдавали высокоцитируемым источникам. Для обзора предметного поля проведенного исследования использовали алгоритм в соответствии с протоколом PRIZMA и составляли схему проведения исследования.

Результаты и их обсуждение

Ультразвуковая технология в пищевой промышленности. Ультразвук определяется как высокочастотная звуковая волна, превышающая предел человеческого слуха (более 20 кГц). Его функциональный механизм основан на прохождении волн, создающих области повышенного и пониженного давления; это изменение акустического давления прямо пропорционально количеству энергии, приложенной к системе. Ультразвук можно разделить на две категории: низкой интенсивности (1–10 Вт/см^2) с частотой 5–10 МГц и высокой интенсивности (10–1000 Вт/см^2) с частотой 20–100 кГц [10, 11]. Ультразвук низкой интенсивности – это неинвазивный и неразрушающий инструмент, используемый для получения информации о физико-химических свойствах пищевых продуктов, таких как структура (форма, размер), состав (содержание сахара и кислотность), состояние (твердость и спелости) при обработке и хранении [12], а ультразвук высокой интенсивности используется для изменения физических, биохимических и реологических свойств пищевых продуктов [13], что улучшает свойства белков, изменяет клетки, способствует химическим реакциям, ингибирует ферменты и т.д.

В пищевой промышленности ультразвук применяют в следующих целях: первая – замена традиционных методов обработки ультразвуком. Сюда следует отнести применения ультразвука для нарезки пищевых продуктов, эмульгирование/гомогенизация, стерилизация/пастеризация и дегазация. Вторая цель – это дополнительный способ к традиционным методам с целью ускорения процесса обработки и улучшения эффективности. Касательно применения ультразвука к пищевым белкам его действие направлено на модификацию этих биополимеров, с целью создания новых ингредиентов с различными физико-химическими характеристиками, которые могут найти широкое применение в пищевой промышленности. В настоящее время ультразвуковую технологию применяют во многих процессах, таких как микробная инактивация, ферментативная инактивация, экстракция биоактивных соединений, в качестве предварительной обработки перед сушкой, замораживанием сушкой, а также для экстракции и модификации биополимеров, таких как углеводы [5, 14].

Действие ультразвука на растительные белки. За последнее десятилетие количество научных исследований о влиянии ультразвука высокой интенсивности на модификацию белков значительно выросло. На рисунке показана динамика роста количества публикаций за период 2010–2023 гг. результатов научных исследований применения ультразвука к растительным белкам. Поиск проводили по ключевым словам «ультразвук» и «растительные белки».



Количество публикаций результатов научных исследований использования ультразвука к растительным белкам за 2011–2023 гг.

В таблице 1 представлены основные результаты, полученные авторами исследования применения ультразвука для модификации белков. В метаанализе, в котором осуществлялось влияние переменных параметров ультразвука на поверхностные свойства пищевых белков, авторы установили, что различные уровни параметров процесса могут изменять их гидрофобные свойства, что указывает на необходимость лучшего понимания воздействия ультразвука на структуру белка [15]. В целом было установлено, что ультразвук изменяет определенные физические, химические и физико-химические свойства, которые более подробно рассмотрены далее.

Таблица 1. Основные результаты исследований влияния ультразвука на растительные белки

Наименование растительного сырья	Параметры импульсной обработки		Результаты ультразвукового воздействия	Источник
1	*2*		*3*	*4*
Горох	57–60 Вт/с^2	Импульсные циклы по 5 с в течение 5 мин	После обработки ультразвуком произошли изменения структурных свойств изолята белка гороха, такие как возможная денатурация или молекулярная перестройка. Ультразвуковая обработка значительно улучшила эмульгирующие свойства изолята белка, повысив его способность образовывать и стабилизировать эмульсии. Эмульсии, приготовленные с использованием обработанного изолята белка, были более стабильны при хранении по сравнению с необработанными фракциями бобовых.	[16]
Картофель	600 Вт	10, 15 и 20 мин	Ультразвуковая обработка способствовала улучшению функциональных свойств белков картофеля, увеличение их способности к эмульгированию, стабильности эмульсии и пенообразования.	[17]
Амарант	500/750 Вт	10 мин	Сочетание обработки изменения pH и ультразвука привело к улучшению пенообразующих свойств белка амаранта. Усвояемость *in vitro* была увеличена за счет комбинированного применения изменения pH и ультразвука.	[18]
Гречиха	55.2–104.5 Вт/см^2	5, 10, 15, 20 и 30 мин, с длительностью импульса 10 с во время активации и 5 с во время деактивации	Установлено изменение вторичной структуры белков. Увеличение растворимости белка	[19]

Продолжение таблицы 1

1	*2*		*3*	*4*
Рыжик (*Camelina sativa*) и Дескурения (*Descurainia sophia*)	180 Вт	20 мин	Применение ультразвука способствовало значительному увеличению степени извлечения белка, а также функциональных свойств изолята белка рыжика и изолята белка сорняка. Увеличение водоудерживающей способности, абсорбции масла, образовании эмульгирующей пены и растворимости белков.	[20]
Семена тигрового ореха (*Cyperus esculentus*)	0, 200, 300, 400, 500 и 600 Вт	30 мин, с длительностью импульса 5 с во время активации и 3 с во время деактивации	Ультразвуковая обработка к значительному улучшила растворимости белков семян *Cyperus esculentus.* Установлено увеличение способности белков образовывать и стабилизировать эмульсии.	[21]
Черная фасоль	150, 300 и 450 Вт	12 и 24 мин	Под воздействием ультразвука образовались новые связующие группы, за счет которых увеличилась водорастворимость Уменьшение размера частиц и усиление взаимодействий между гидрофобными группами оказались важными факторами, повлиявшими на образование гелей с высокой водоудерживающей способностью.	[22]
Грецкий орех	200 Вт	20 мин	Ультразвуковая обработка повышала растворимость, эмульгирующую активность, пенообразующую способность и стабильность пены полученных белков.	[23]
Рапс (*Brassica napus* L.)	130 Вт	15 и 30 мин	Обработка высокоинтенсивным ультразвуком привела к изменению функциональных свойств изолята белка. Это включало изменения в способности к эмульгированию, стабильности эмульсии, способности к водопоглощению и способности к гелеобразованию. Установлены изменения вторичной структуры белков.	[24]
Шрот подсолнечный	220 Вт $л^{-1}$	15 мин	Использование ультразвука повысило эффективность экстракции белка по сравнению с традиционными методами. Белки, экстрагированные ультразвуком, показали изменения своих физико-химических свойств и улучшение функциональных свойств, таких как растворимость, эмульгирующая способность и стабильность.	[25]
Фасоль Фава (*Vicia faba* L.)	500/750 Вт	17.29 мин	Обработка ультразвуком высокой интенсивности привела к изменению поверхностных свойств белка бобов фава. Это включало изменения гидрофобности и поверхностного заряда белков, что указывает на возможную реорганизацию и обнажение функциональных групп. Обработка ультразвуком улучшила пенообразующую способность белка бобов фава. Установлены изменения вторичной структуры белков.	[26]
Просо	18.4, 29.58 и 73.95 Вт/$см^2$	5, 12.5 и 20 мин	Применение ультразвука привело к увеличению растворимости за счет воздействия внутренних полярных групп. Образование пены также улучшилось при применении ультразвука высокой амплитуды в течение более длительного периода времени. При воздействии ультразвука значительно увеличивается способность белка стабилизировать эмульсии	[27]
Семена джекфрута	200, 400 и 600 Вт	15 мин, с длительностью импульса 5 с во время активации и 1 с во время деактивации	Наблюдалось увеличение способности к образованию и стабилизации эмульсии, водоудерживающей способности, маслопоглощающей способности и растворимости.	[28]

Окончание таблицы 1

1	*2*		*3*	*4*
Арахис	0, 120, 300, 480, 660, 840, 1020 Вт	0, 1, 3, 5, 10, 20, 30 мин, с длительностью импульса 9 с во время включения и 1 с во время деактивации	Ультразвуковая обработка вызвала изменения в структуре изолята белка арахиса, это привело к значительному увеличению эмульгирующих свойств изолята белка арахиса. Эмульсии, приготовленные с использованием изолята арахисового белка, обработанного ультразвуком, продемонстрировали большую стабильность по сравнению с эмульсиями необработанного изолята.	[29]
Соя	105–110 Вт/см^3	5, 40 мин	После воздействия ультразвука высокой интенсивности прочность геля значительно увеличилась с 34.5 до 207.1 г. Кроме того, выход геля и водоудерживающая способность также увеличились после предварительной обработки ультразвуком. Растворимость обработанного ультразвуком образца выше, чем у необработанного	[30]
Овсяная крупа	35 кГц, 42 кГц	10, 15, 20, 25, 30 мин	При 10 мин воздействия ультразвуком частотой 35 кГц с начальной температурой 25 °С наблюдается прирост на 0.7%, в течение 30 мин с той же температурой прирост сырого белка 7.9%, после 30 мин обработки – на 29.4%. При обработке мощностью 42 кГц в начальных условиях прирост составляет 1.7%, в максимальных исследуемых условиях – уже 42.1%	[31]
Перловая крупа	35 кГц, 42 кГц	10, 15, 20, 25, 30 мин	Содержание сырого белка у перловой крупы при обработке ультразвуком с частотой 35 кГц при минимальных условиях обработки увеличилось на 1.6%. При максимальных характеристиках обработки на данной частоте прирост составляет 32.1% Белок крупы, обрабатываемой при частоте 42 кГц, также увеличил свое содержание в диапазоне 3.1 до 42.6% в зависимости от режима обработки	[31]
Мятка из ядер кедровых орехов, мука их жмыха кедровых орехов	16 Вт/см^2	30 и 60 с	Согласно экспериментальным данным, в эмульсиях «растительных сливок» мицеллы диспергированы и распределены в объеме эффективнее (размеры мицелл от 32 до 55 мкм), чем в эмульсиях «растительного молока» (размеры мицелл от 55 до 75 мкм, в зависимости от продолжительности обработки). Увеличение продолжительности ультразвукового воздействия коррелирует с уменьшением размеров мицелл	[32]

Л.О. Шагинова, М.Л. Доморощенкова, Т.Ф. Демьяненко и И.В. Крылова исследовали влияние ультразвуковой обработки при переработке безлузгового жмыха семян подсолнечника с целью увеличения выхода белка в процессах производства концентрата и изолята подсолнечного белка со светлой окраской и при получении функциональных белковых напитков из семян подсолнечника. Установлено, что при использовании ультразвуковой обработки семян подсолнечника содержание сухих веществ и сырого протеина в белковых экстрактах возрастает по мере увеличения времени обработки, что может использоваться для увеличения выхода белка в процессах производства концентрата и изолята подсолнечного белка, а также при получении функциональных белковых напитков из семян подсолнечника. Дополнительно показано, что обработка ультразвуком белковых растворов, полученных после проведения экстракции белковых веществ и удаления нерастворимого осадка, существенно улучшает их седиментационную устойчивость и внешний вид по сравнению с традиционной обработкой в диспергаторе, что перспективно для использования в процессах получения аналогов молока [33].

Следует отметить исследование российских авторов Е.В. Ожимковой и В.В. Орлова, в работе которых экспериментально подобраны условия ультразвукового воздействия, обеспечивающие максимальный выход белковых комплексов из семян бобовых культур [34]. Для проведения исследований использовались образцы зеленого и желтого гороха, белой и красной фасоли, красные бобы и зеленая чечевица. Используемое в ходе исследования низкочастотное ультразвуковое воздействие позволило повысить выход белковой пасты в несколько раз (в 3.5 при использовании в качестве сырья чечевицы и в 6 раз при использовании белой фасоли) по сравнению с экстракцией без использования ультразвука. Пенообразующая способность

и стабильность получаемых пен, полученных из белковых комплексов семян бобовых, позволяет рассматривать их в качестве функциональных компонентов для расширения ассортимента высококачественных продуктов питания, создания продуктов диетического и лечебно-профилактического назначения.

Влияние на физико-химические показатели. Воздействие ультразвука на растительные белки может привести к существенным изменениям их структуры, функциональных свойств и физико-химических показателей. Среди физико-химических модификаций, индуцированных ультразвуком, следует отметить изменение гидрофобности поверхности, вторичной структуры, сульфгидрильных групп и кристалличности растительных белков [35, 36].

Гидрофобность поверхности. Гидрофобность поверхности – одно из основных свойств белков, влияющее на их стабильность и взаимодействие с другими молекулами. Оно определяется конформацией и последовательностью аминокислот на поверхности белка, что может напрямую влиять на гидратацию и взаимодействие белка с окружающей средой. Поверхностная гидрофобность белков играет решающую роль в модуляции их функциональности и взаимодействия с другими биомолекулами. Например, белки с гидрофобной поверхностью обладают более высоким сродством к липидным мембранам, а белки с гидрофильной поверхностью – к водным растворам. Таким образом, гидрофобность поверхности является важной характеристикой, которую следует учитывать при разработке пищевых продуктов на основе белка [37]. Ультразвук может оказывать различное влияние на гидрофобность белка в зависимости от параметров обработки. В целом ультразвук способен вызывать изменения конформации и стабильности белков, что приводит к изменениям их гидрофобных свойств [38]. Параметры ультразвукового процесса имеют решающее значение для определения их влияния на гидрофобность белка. Взаимосвязь между временем и амплитудой ультразвуковой обработки и гидрофобностью белка установлена при модификации белка гречихи [19]. Вместе с тем, когда белки подвергаются воздействию высоких уровней мощности во время обработки ультразвуком, возникают гидрофобные взаимодействия из-за реполимеризации структуры белка, что приводит к снижению гидрофобности поверхности [39]. Кроме того, длительное воздействие на белок может способствовать изменению структуры, снижая гидрофобность поверхности [40]. Khan, Z.S. et.al. провели исследование влияния ультразвука на структурные и функциональные свойства белкового концентрата семян облепихи (*Hippophae rhamnoides L.*). В исследовании применялось различное время обработки ультразвуком (0, 5, 15, 25 и 35 мин) при постоянной мощности 500 Вт/см^2. Результаты показали увеличение гидрофобности поверхности белковых концентратов семян облепихи после обработки ультразвуком. Однако по мере увеличения времени обработки установлено образование агрегатов белка, что приводило к снижению гидрофобности поверхности по сравнению с образцами, обработанными в течение более короткого периода. Эти результаты подчеркивают важность точного контроля времени обработки ультразвуком для изменения свойств белков облепихи [41]. Изучение различных сочетаний времени и мощности представляет собой перспективное направление исследований по оптимизации технологических и функциональных характеристик белкового концентрата.

Согласно исследованию, проведенному A.P.H. de Oliveira, M.H. Omura, É.D.A.A. Barbosa et al., было установлено, что комбинированное регулирование pH и ультразвуковой обработки (мощности и времени) может изменить техно-функциональность концентратов горохового белка. Увеличение мощности и времени воздействия ультразвуковой обработки белка при различных тестируемых уровнях pH (4.3, 6.8 и нескорректированный pH способствует увеличению эмульгирующей способности. В частности, было замечено, что при pH 4.3 наибольшая экспозиция наблюдалась после обработки ультразвуком мощностью 637.5 Вт и временем 376.47 с, в результате чего индекс гидрофобности поверхности был в 9 раз выше по сравнению с контролем. Кроме того, для образца без корректировки pH показатель гидрофобности поверхности был в пять раз выше после обработки ультразвуком мощностью 487.5 Вт и временем 492.31 с по сравнению с контрольным образцом [42]. Эти результаты показывают, что не только общая энергия воздействия ультразвука, передаваемая белкам в водной среде, является важным фактором, но и скорость подачи этой энергии. Выводы данного исследования показывают способы для улучшения технологических и функциональных свойств горохового белка, таких как растворимость, эмульгирование и стабильность. Кроме того, эти выводы открывают новые возможности для будущих исследований, направленных на оптимизацию процессов и расширение использования этих методов на другие растительные белки.

Вторичная структура. Вторичная структура белков характеризуется расположением полипептидных цепей в повторяющиеся структуры, включая α-спирали, β-листы и другие менее распространенные структуры.

Это обеспечивается за счет взаимодействия водородных связей между соседними аминокислотными остатками в полипептидной цепи с участием атомов азота и кислорода. Формирование вторичной структуры является решающим моментом в организации трехмерной или третичной структуры белка и также может влиять на его функциональность. Например, вторичная структура белка может влиять на образование активных центров, взаимодействие с другими белками и стабильность в различных условиях [43]. Использование ультразвука (УЗИ) изучалось как метод модификации вторичной структуры белков. Ультразвук высокой интенсивности может генерировать исключительно высокое давление (>1000 атм) в течение короткого периода времени из-за быстрого коллапса кавитационных пузырьков, обеспечивая значительную энергию для модификации белковых структур [44]. Это может вызвать изменения в сети водородных связей, которые стабилизируют вторичную структуру белка, включая разрыв связей, переориентацию и образование новых связей [45]. Ультразвук высокой интенсивности может оказывать различное воздействие на вторичную структуру белков (табл. 2.).

Изменения во вторичной структуре могут влиять на функции белка, такие как растворимость, способность к гелеобразованию и образование эмульсии [52]. Следует отметить, что влияние ультразвука на вторичную структуру белков может зависеть от амплитуды, частоты и времени воздействия ультразвука, а также от концентрации и типа белка. Aiello et al. провели оценку конформационных изменений белков, присутствующих в побочном продукте соевой пульпы (окара), с использованием ультразвука в качестве метода экстракции. Результаты подтвердили эффективность ультразвука в индукции изменений во вторичных и третичных структурах белков. Результаты данного исследования позволяют сделать вывод о том, что ультразвук может стать перспективным методом модификации и улучшения функциональных свойств белков, присутствующих в окаре, также возможности для его использования в различных продуктах в пищевой промышленности [53]. В другом исследовании Yang et al. также наблюдали влияние ультразвука на изолят соевого белка. Действие ультразвука вызвало изменения вторичной структуры белков, что привело к реорганизации этих белков на границах раздела. В результате такой реорганизации произошло заметное усиление взаимодействия белка с присутствующими липидами, что, в свою очередь, привело к значительному усилению эмульгирующих свойств белка. При воздействии ультразвука белки продемонстрировали большую способность снижать межфазное натяжение между каплями масла и воды, повышая их эмульгирующую способность [21, 54]. Эти результаты показывают, что использование ультразвука может быть эффективным подходом к улучшению функциональности соевых белков, делая их более подходящими для различных промышленных применений, особенно при приготовлении эмульсий и пищевых продуктов, требующих улучшенной стабильности и текстуры. Zhu et al. провели исследование, чтобы оценить, как использование ультразвука влияет на физико-химические, молекулярные и функциональные свойства изолята белка грецкого ореха [55]. Авторы установили, что использование этой технологии привело к уменьшению количества α-спиралей и увеличению β-листов белка, и пришли к выводу, что эти изменения во вторичной структуре объясняют увеличение водорастворимости, эмульгирующей активности белка грецкого ореха. Исследование также показало, что применение ультразвука не влияет на свойства, связанные с первичной структурой белка, такие как молекулярная масса. Результаты проведенных исследований показывают, что ультразвук может быть эффективным методом улучшения функциональных характеристик белков, особенно тех, которые связаны с их вторичной структурой.

Таблица 2. Влияние ультразвука высокой интенсивности на вторичную структуру белков

Разворачивание α-спирали	Ультразвук способен разрушать водородные связи, которые поддерживают свернутые и уплотненные α-спирали в белке [46]. Это может привести к частичному или полному разворачиванию α-спиралей и реорганизации вторичной структуры белка [47, 48]
Дестабилизация β-листа	Ультразвук потенциально может вызвать возбуждение в структуре белка и нарушить взаимодействия Ван-дер-Ваальса, которые поддерживают сложенную конформацию β-листов. Это может привести к дестабилизации бета-листов и частичному или полному разворачиванию структур [49]
Повышенная доступность аминокислотных остатков	Ультразвук может повысить доступность аминокислотных остатков, которые обычно скрыты внутри структуры белка, что может повлиять на биологическую активность или взаимодействие белка с другими соединениями [50]
Изменение термической стабильности	Ультразвук способен изменять термическую стабильность белков, увеличивая или уменьшая температуру, необходимую для денатурации белков [51]

Свободные сульфгидрильные группы. Дисульфидные связи играют важную роль в поддержании конформации белка, обеспечении его структурной стабильности. Однако нарушение этих связей может вызвать дестабилизацию белка, обнажая сульфгидрильные группы и приводя к денатурации белка [56]. Таким образом, количество свободных сульфгидрильных групп, присутствующих в белке, напрямую связано со степенью денатурации, что является показателем потери нативной конформации [38]. Jin et al. установили, что обработка ультразвуком является эффективным методом увеличения общего содержания сульфгидрила в белке гречихи, увеличение составило 16.9% [57]. Это может иметь перспективу использования в пищевой промышленности, поскольку повышенное содержание сульфгидрила может улучшить функциональные характеристики белков, такие как растворимость и вязкость, что делает их более приемлемыми для пищевых продуктов. Zhao et al. показали, что обработка изолятов соевого белка ультразвуком значительно увеличивает содержание сульфгидрила. Вместе с тем чрезмерно высокие уровни мощности ультразвука могут вызвать частичную агрегацию белков, что приведет к снижению содержания сульфгидрила. Кроме того, авторы предполагают, что повышенное содержание сульфгидрила могло способствовать повышению растворимости белка, поскольку оно тесно связано с изменениями функциональных свойств белка [58]. Xiong et al. провели исследование по изучению влияния ультразвука высокой интенсивности (20 кГц, с переменной амплитудой 30, 60, 90% в течение 30 мин) на структуру и пенообразующие свойства изолята горохового белка. Результаты показали, что процесс обработки ультразвуком вызвал частичное разворачивание белков гороха, что объясняется кавитацией во время процедуры [59]. Детальное понимание этого процесса структурной модификации имеет первостепенное значение для оптимизации использования растительных белков в пищевых продуктах, а также при разработке новых продуктов.

Влияние на технико-функциональные свойства растительных белков

Растворимость. Высокая растворимость считается необходимым условием успешного функционального применения изолятов белка в пищевых продуктах. Влияние ультразвука на растворимость белков можно объяснить физическими и механическими изменениями, создаваемыми этим методом. Ультразвук может вызвать акустическую кавитацию, то есть образование и коллапс микроскопических пузырьков в растворителе [5]. Эти пузырьки генерируют ударные волны, которые могут разрушать слабые связи и межмолекулярные силы, поддерживающие белки в их естественной конформации. В результате белки становятся более подверженными воздействию раствора, что способствует их солюбилизации [6]. Кроме того, ультразвук может генерировать тепло за счет преобразования механической энергии в тепловую. Это выделяемое тепло может способствовать солюбилизации белков, которые по своей природе нерастворимы в водных растворах [60]. Однако важно отметить, что чрезмерное нагревание и механическое воздействие могут привести к денатурации и агрегации из-за гидрофобных характеристик поверхности белков [7]. Такая агрегация белков может ухудшить качество и функциональность белков, особенно их растворимость, поэтому необходимо установить соответствующие параметры ультразвука для каждого типа исследуемого белка.

G. Loushigam & A. Shanmugam провели исследование, в котором они выделили белок из вигны с помощью ультразвуковой экстракции и исследовали технико-функциональные характеристики белковых изолятов в различных условиях обработки ультразвуком, используя уровни мощности 100 и 200 Вт и время обработки от 5 до 20 мин [61]. Результаты показали, что использование ультразвука мощностью 200 Вт в течение 10 мин дало наилучшие результаты по всем оцениваемым свойствам. При таких условиях обработки установлено значительное увеличение выхода белка (31.78–58.96%) и растворимости (57.26–68.85%). Эти результаты показывают, что экстракция с помощью ультразвука является эффективным методом повышения выхода и растворимости белка вигны, что делает его более эффективным для использования в пищевой промышленности. Н.В. Яковченко, Н.В. Попова изучили влияние предварительной обработки сырья на функционально-технологические свойства растительного молока. В качестве объекта исследования было использовано растительное молоко разных видов, полученное из тыквенных семечек, зеленой гречихи, чечевицы, сои, гороха, овса [62]. Установлено, что ультразвуковая обработка сырья увеличила выход белка для гречихи, чечевицы, что, предположительно, связано с изменением конформации белковых молекул сырья. Изменение дисперсных свойств белка приводит к их снижению, из-за чего белковая фаза эффективнее переносится в раствор. Конформационные изменения вторичной и третичной структуры белка способствуют более активному протеканию данного процесса, что и обусловливает увеличенный выход белка. Кроме того, результаты могут послужить основой для будущих исследований в этой области, изучения

других источников растительного белка и корректировки условий обработки ультразвуком для улучшения функциональных и технологических свойств.

pI (изоэлектрическая точка) – это pH, при котором белок имеет нулевой суммарный заряд и он может варьироваться в зависимости от белка и зависеть от таких факторов, как химическая среда, в которую погружен белок, и собственная структура белка. Ультразвук может влиять на pI белков в зависимости от условий, в которых применяется метод. Сдвиг значений pI может быть связан с ионизируемыми группами, окклюдированными в трехмерной структуре белков, которые обнажаются после процесса обработки ультразвуком, что приводит к увеличению поверхностного заряда белков [63]. Если эти окклюдированные группы являются преимущественно отрицательными (COO^- из аспарагиновой и глутаминовой кислот), pI смещается в сторону более щелочных значений pH, а если преимущественно положительными (NH^{3+} из лизина и гистидина), pI смещается в сторону более кислых значений pH. Необходимо подчеркнуть, что влияние ультразвука на pI белков может зависеть от типа белка, параметров ультразвука и химических условий, в которыех находится белок.

Влагосвязывающая способность белка. Воздействие высокоинтенсивного ультразвука на белки может оказывать существенное влияние на их влагосвязывающую способность, что является важнейшей характеристикой для определения качества и текстуры пищи. Это относится к способности белков связывать и удерживать молекулы воды, тем самым влияя на сочность, нежность и текстуру конечного продукта [64]. Кроме того, гидратациия белка тесно связана с такими свойствами, как растворимость, диспергируемость, смачиваемость, расширение и загустение. Ультразвук высокой интенсивности может вызывать различные изменения в структуре и конформации пищевых белков. Он обладает способностью разрушать нековалентные связи внутри белков, что приводит к изменениям в их трехмерной структуре [46]. Следовательно, это воздействие может способствовать повышению доступности функциональных групп и мест связывания воды внутри белков, тем самым повышая их водоудерживающую способность. Гидрофобно-гидрофильный баланс аминокислот играет решающую роль в определении водоудерживающей способности, поскольку любые нарушения этого равновесия могут повлиять на гидратационные свойства белка [65]. Уменьшение размера частиц, увеличение площади поверхности и повышенная растворимость являются дополнительными факторами, которые могут способствовать улучшению водоудерживающей способности [30, 66].

Кроме того, ультразвук высокой интенсивности может вызывать денатурацию белков, что приводит к изменению их физических и структурных свойств. Эти изменения могут включать образование белковых агрегатов и изменения растворимости белков. Такие преобразования могут влиять на способность белков взаимодействовать с молекулами воды и удерживать их, также повышенное воздействие гидрофобных групп может снизить взаимодействие воды с белком [28]. Тем не менее необходимо отметить, что воздействие ультразвука на водоудерживающую способность пищевых белков может варьироваться в зависимости от условий обработки, таких как интенсивность и продолжительность воздействия ультразвука [65, 67–69], тип используемого ультразвука [67], интенсивность электрического поля [70] и pH [71]. Более того, разные белки могут проявлять различную реакцию на высокоинтенсивный ультразвук.

M.H. Omura, A.P.H. de Oliveira et al. провели исследование, в котором изучали влияние ультразвуковой обработки на различные концентрации белка, анализируя технико-функциональные свойства изолята соевого белка (SPI), изолята рисового белка (RPI) и концентрата горохового белка (PPC) [72]. Ультразвуковые параметры (УЗИ) разрабатывались путем варьирования мощности ультразвука (562.5, 637.5 или 712.5 Вт), времени воздействия (120, 360 или 600 с) и концентрации белка в водной среде (1.0, 3.0 или 5.0%). Результаты показали, что ультразвуковая обработка эффективна для улучшения технологической функциональности SPI и PPC при определенных условиях. Для изолята соевого белка ультразвук при мощности 562.5 Вт и времени 120 с с использованием концентрации белка 5.0% (мас./об.) приводил к увеличению водоудерживающей способности. Для PPC – увеличение диспергируемости, водоудерживающей способности, и стабильность эмульсии масло-в-воде наблюдались при различных сочетаниях мощности и времени нанесения с использованием определенных концентраций белка. Однако ультразвуковая обработка не привела к существенному изменению физико-химических и технико-функциональных свойств изолята рисового белка, что представляет собой проблему, которую необходимо исследовать. Таким образом, исследование показало, что ультразвуковая обработка может быть эффективным методом улучшения технологической функциональности SPI и PPC. Следует отметить, что для достижения наилучших результатов во время ультразвуковой обработки концентрацию белка следует поддерживать ниже 5.0% (мас./об.). Подводя итог, можно сказать, что высокоэнергетический

ультразвук может повысить водоудерживающую способность пищевых белков за счет структурных и конформационных изменений. Эта модификация может существенно повлиять на качество и текстуру пищевых продуктов, обработанных с использованием этой технологии.

Вязкость. Вязкость и гелеобразование являются функциональными свойствами, представляющими большой интерес для пищевой промышленности. В настоящее время изучено несколько методов улучшения гелеобразующих свойств белков, и среди этих методов выделяется ультразвук [73]. Ультразвук – высокоэффективный, экономичный и простой в использовании физический метод, который может вызывать изменения гелеобразующих свойств белков, что делает его перспективным для использования в различных отраслях пищевой промышленности [5]. Ультразвук широко изучается как перспективный метод модификации свойств различных материалов, включая пищевые белки. Вязкость белков меняется после различных ультразвуковых обработок, так как меняется влагоудерживающая способность из-за изменений воздействия гидрофильных групп белка [74].

При использовании ультразвуковой технологии к белковым растворам ультразвук может влиять на вязкость несколькими способами:

1. *Дезагрегация, деполимеризация и фрагментация белка*. Ультразвуковая энергия высокой интенсивности может вызвать дезагрегацию и фрагментацию белковых структур, что приводит к разрыву нековалентных связей, таких как водородные связи и гидрофобные взаимодействия. Это может привести к снижению вязкости белкового раствора [26, 75–77].

2. *Денатурация белка*. Применение высокоинтенсивного ультразвука может вызвать денатурацию белка, т.е. изменения в трехмерной структуре белка [5].#При денатурации происходит нарушение нативной конформации белков в результате разрыва слабых связей (ионных, водородных, гидрофобных взаимодействий). В результате этого процесса могут разрушаться четвертичная, третичная и вторичные структуры белка. Эти структурные изменения приводят к увеличению вязкости белкового раствора.

3. *Образование агрегатов белка*. В некоторых случаях действие ультразвука высокой интенсивности может привести к образованию агрегатов белка, что приводит к увеличению вязкости [68, 69]. Эти агрегаты могут образовываться за счет агломерации денатурированных или фрагментированных белков.

4. *Модификация межфазных свойств*. Ультразвук может изменять межфазные свойства белков, такие как поверхностное натяжение [26] и эмульгирующая стабильность [5]. Эти модификации могут косвенно влиять на вязкость белкового раствора, в зависимости от взаимодействия белков с окружающей средой. Необходимо отметить, что влияние ультразвука на вязкость пищевых белков может варьироваться в зависимости от параметров, таких как мощность ультразвука [27], время воздействия [78], и pH раствора [79, 80]. Кроме того, разные белки могут по-разному реагировать на ультразвуковое воздействие из-за их структуры и внутренних свойств. Поэтому необходимо проводить исследования для каждого белка или белковой системы, чтобы полностью понять влияние ультразвука высокой энергии на вязкость пищевых белков.

Усвояемость. Когда модифицированный белок используется для повышения пищевой ценности продукта, то наряду с хорошей функциональностью белок также должен быть легкоусвояемый [81]. Высокоинтенсивный ультразвук может влиять на усвояемость белка по-разному, в зависимости от условий обработки, типа белка и вида пищеварительного фермента. Как правило, ультразвук может улучшить усвояемость белка за счет двух основных механизмов: деградации и солюбилизации белка, а также изменения конформации белка. Ультразвук способен разрушать структуру белка, дезагрегируя молекулы и делая их более растворимыми и доступными для пищеварительных ферментов [82]. Это позволяет повысить эффективность ферментативного гидролиза и, как следствие, улучшить усвояемость белков. Кроме того, ультразвук может изменять конформацию белка [81], что приводит к увеличению воздействия участков связывания ферментов и улучшению доступности субстрата для пищеварительных ферментов. Однако необходимо отметить, что ультразвук также может снизить усвояемость белка в зависимости от условий обработки. Например, ультразвук высокой интенсивности может привести к образованию белковых агрегатов и, как следствие, к снижению растворимости и усвояемости белков. Реакции обмена сульфгидрил-дисульфидных белков под воздействием ультразвука высокой интенсивности или ультразвуковой кавитации могут агрегировать дисульфидно-расширенные белки, усиливая реконструкцию связей S-S [83]. Кроме того, на усвояемость белка также могут влиять интенсивность и продолжительность ультразвука, и тип белка [24, 84]. Что касается усвояемости белков, обработанных ультразвуком, с помощью различных протеаз,

конформационные изменения в структуре белка могут ингибировать или усиливать доступ к активным центрам, тем самым изменяя усвояемость этих белков [51]. Поэтому важно тщательно подобрать условия ультразвуковой обработки, чтобы оптимизировать усвояемость белка. N.T. Flores-Jiménez et al. провели исследование о влиянии ультразвука на физико-химические и функциональные свойства изолята белка семян гуамучила (GSPI) [85]. Для этого готовили суспензии GSPI с концентрацией 10% и подвергали ультразвуковой обработке зондом с частотой 20 кГц при трех уровнях мощности (200, 400 и 600 Вт) в течение 15 и 30 мин. Кроме того, образцы без обработки ультразвуком сохранялось в качестве контроля для целей сравнения. Результаты показали, что ультразвук оказал значительное влияние на белковые структуры GSPI, модифицировал вторичные и третичные белковые структуры GSPI, что увеличило гидрофобность поверхности, молекулярную гибкость и усвояемость белков GSPI *in vitro* на 114.8, 57.3 и 12.5% соответственно. Кроме того, при ультразвуковом воздействии наблюдалось максимальное снижение размера частиц на 11.9% и мутности на 55.2% суспензий GSPI, а также более крупные и пористые агрегаты в лиофилизированных порошках GSPI. Эти структурные и физико-химические изменения привели к улучшению растворимости до 115.5%, маслопоглощающей способности на 39.8%, в то время как увеличение эмульгирующих, пенообразующих, гелеобразующих, текучих и когезионных свойств GSPI составило 87.4, 74.2, 40.0, 44.4 и 8.9% соответственно.

Выводы

Использование ультразвукового воздействия позволит разработать эффективную технологию, которую можно использовать в пищевой промышленности для улучшения и модификации физико-химических и функциональных свойств растительных белков. Данный метод имеет такие преимущества, как энергоэффективность, более короткое время обработки и сокращение или исключение использования органических растворителей. При этом применение ультразвука высокой интенсивности при обработке растительных белков имеет и определенные недостатки, включая денатурацию белков, необходимость в специализированном оборудовании и ограниченность промышленного внедрения. Вместе с тем, учитывая растущий интерес к замене белков животного происхождения альтернативами растительного происхождения, использование ультразвука в качестве метода модификации растительных белков имеет значительные перспективы применения в промышленности. Это может способствовать улучшению качества и функциональности растительных белков, расширению возможностей их применения в пищевых продуктах. Результаты обзора научных исследований показали потенциал ультразвука как эффективного инструмента для модификации растительных белков и его влияние на структурные и функциональные свойства растительных белков. Эти модификации могут привести к улучшению функциональных свойств белков, таких как водоудерживающая способность, растворимость и вязкость. На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что ультразвук следует рассматривать как эффективную технологию модификации растительных белков, открывающую новые возможности для разработки инновационных пищевых ингредиентов и продуктов. Результаты данного научного обзора могут представлять интерес для дальнейших научных исследований, а также практического применения ультразвука в пищевой промышленности, способствуя более эффективному использованию растительных белков.

Финансирование
Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Общества с ограниченной ответственностью «БЕЛРОСАКВА». Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов
Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Открытый доступ
Эта статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии, что вы дадите соответствующие ссылки на автора(ов) и источник и предоставите ссылку на Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.

Список литературы

1. Shokri S., Javanmardi F., Mohammadi M., Mousavi Khaneghah A. Effects of ultrasound on the techno-functional properties of milk proteins: A systematic review // Ultrason Sonochem. 2022. Vol. 83. 105938. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.105938.
2. Joshi S., Bathla S., Singh A., Sharma M., Stephen Inbaraj B., Sridhar K. Development of mung bean (*Vigna radiate* L.)-based next-generation vegan milk: processing, nutritional composition and quality attributes // International Journal of Food Science & Technology. 2023. Vol. 58. Pp. 785–794. https://doi.org/10.1111/ijfs.16233.
3. Valero-Cases E., Frutos M.J., Pérez-Llamas F. Development of synbiotic vegan beverages: probiotic viability, sensory profile, consumers' acceptance and functional stability // International Journal of Food Science & Technology. 2023. Vol. 58(5). Pp. 2325–2335. https://doi.org/10.1111/ijfs.16361.
4. Gharibzahedi S.M.T., Smith B. The functional modification of legume proteins by ultrasonication: A review // Trends in Food Science & Technology. 2020. Vol. 98. Pp. 107–116. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.02.002.
5. Su J., Cavaco-Paulo A. Effect of ultrasound on protein functionality // Ultrasonics sonochemistry. 2021. Vol. 1(76). 105653. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105653.
6. Ampofo J., Ngadi M. Ultrasound-assisted processing: science, technology and challenges for the plant-based protein industry // Ultrasonics Sonochemistry. 2022. Vol. 84. 105955. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.105955.
7. Zou Y., Wang L., Li P. et al. Effects of ultrasound assisted extraction on the physiochemical, structural and functional characteristics of duck liver protein isolate // Process Biochemistry. 2017. Vol. 52. Pp. 174–182. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2016.09.027.
8. Magalhães I.S., Guimarães A.D.B., Tribst A.A.L., Oliveira E.B.D., Leite Júnior B.R.D.C. Ultrasound-assisted enzymatic hydrolysis of goat milk casein: effects on hydrolysis kinetics and on the solubility and antioxidant activity of hydrolysates // Food Research International. 2022. Vol. 157. 111310. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111310.
9. Pacheco A.F.C., De Souza L.B., Paiva P.H.C. Impact of ultrasound on pumpkin seed protein concentrate hydrolysis: effects on Alcalase, protein, and assisted reaction // Applied Food Research. 2023. Vol. 3. 100281. https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100281.
10. Alarcon-Rojo A.D., Carrillo-Lopez L.M., Reyes-Villagrana R., Huerta-Jiménez M., Garcia-Galicia I.A. Ultrasound and meat quality: A Review // Ultrasonics Sonochemistry. 2018. Vol. 55. Pp. 369–382. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.09.016.
11. Burak L. Ch., Yablonskaya V.V., Sapach A.N. The impact of modern techniques treatments for antioxidant activity and antimicrobial ability of honey (review) // Modern Science and Innovations. 2023. Vol. 3, no. 43. Pp. 141–155. https://doi.org/10.37493/2307-910X.2023.3.13.
12. Amiri A., Sharifian P., Soltanizadeh N. Application of ultrasound treatment for improving the physicochemical, functional and rheological properties of myofibrillar proteins // International journal of biological macromolecules. 2018. Vol. 111. Pp. 139–147. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.12.167.
13. Bhargava N., Mor R.S, Kumar K., Sharanagat V.S. Advances in application of ultrasound in food processing: A review // Ultrasonics sonochemistry. 2021. Vol. 70. 105293. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105293.
14. Бурак Л.Ч. Нетермические методы консервирования фруктовых соков // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2022. №9. С. 75–85. https://doi.org/10.17513/mjpfi.13444.
15. Bezerra J.D.A., Sanches E.A., Lamarão C.V., Campelo P.H. Ultrasound and effect on the surface hydrophobicity of proteins: a meta-analysis // International Journal of Food Science & Technology. 2022. Vol. 57. Pp. 4015–4026. https://doi.org/10.1111/ijfs.15774.
16. Sha L., Xiong Y.L. Comparative structural and emulsifying properties of ultrasound-treated pea (*Pisum sativum* L.) protein isolate and the legumin and vicilin fractions // Food Research International. 2022. Vol. 156. 111179. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111179.
17. Hussain M., Qayum A., Zhang X. et al. Improvement in bioactive, functional, structural and digestibility of potato protein and its fraction patatin via ultra-sonication // LWT. 2021. Vol. 148. 111747. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111747.
18. Figueroa-González J.J., Lobato-Calleros C., Vernon-Carter E.J., Aguirre-Mandujano E., Alvarez-Ramirez J., Martínez-Velasco A. Modifying the structure, physicochemical properties, and foaming ability of amaranth protein by dual pH-shifting and ultrasound treatments // LWT. 2022. Vol. 153. 112561. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112561.
19. Jin J., Okagu O.D., Yagoub A.E.A., Udenigwe C.C. Effects of sonication on the in vitro digestibility and structural properties of buckwheat protein isolates // Ultrasonics Sonochemistry. 2021. Vol. 70. 105348. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105348.
20. Ngo N.T.T., Shahidi F. Functional properties of protein isolates from camelina (*Camelina sativa* (L.) Crantz) and flixweed (sophia, *Descurainis Sophia* L.) seed meals // Food Production. Processing and Nutrition. 2021. Vol. 3. P. 31. https://doi.org/10.1186/s43014-021-00076-8.
21. Cui L., Kimmel J., Zhou L., Chen B., Rao J. Improving the functionality of pea protein isolate through co-spray drying with emulsifying salt or disaccharide // Food Hydrocolloids. 2021. Vol. 113. 106534. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106534.
22. Li L., Zhou Y., Teng F. et al. Application of ultrasound treatment for modulating the structural, functional and rheological properties of black bean protein isolates // International Journal of Food Science & Technology. 2020. Vol. 55. Pp. 1637–1647. https://doi.org/10.1111/ijfs.14428.

23. Lv S., Taha A., Hu H., Lu Q., Pan S. Effects of ultrasonic-assisted extraction on the physicochemical properties of different walnut proteins // Molecules. 2019. Vol. 24. 4260. https://doi.org/10.3390/molecules24234260.
24. Flores-Jiménez N.T., Ulloa J.A., Silvas J.E.U. et al. Effect of high-intensity ultrasound on the compositional, physicochemical, biochemical, functional and structural properties of canola (*Brassica napus* L.) protein isolate // Food Research International. 2019. Vol. 121. Pp. 947–956. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.01.025.
25. Dabbour M., He R., Ma H., Musa A. Optimization of ultrasound assisted extraction of protein from sunflower meal and its physicochemical and functional properties // Journal of Food Process Engineering. 2018. Vol. 41. 12799. https://doi.org/10.1111/jfpe.12799.
26. Martínez-Velasco A., Lobato-Calleros C., Hernández-Rodríguez B.E., Román-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. 2018. Vol. 44. Pp. 97–105. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.02.007.
27. Nazari B., Mohammadifar M.A., Shojaee-Aliabadi S., Feizollahi E., Mirmoghtadaie L. Effect of ultrasound treatments on functional properties and structure of millet protein concentrate // Ultrasonics Sonochemistry. 2018. Vol. 41. Pp. 382–388. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.10.002.
28. Resendiz-Vazquez J.A., Ulloa J.A., Urías-Silvas J.E. et al. Effect of high-intensity ultrasound on the technofunctional properties and structure of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) seed protein isolate // Ultrasonics Sonochemistry. 2017. Vol. 37. Pp. 436–444. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.01.042.
29. Zhang Q.-T., Tu Z.-C., Xiao H. et al. Influence of ultrasonic treatment on the structure and emulsifying properties of peanut protein isolate // Food and Bioproducts Processing. 2014. Vol. 92. Pp. 30–37. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2013.07.006.
30. Zhang P., Hu T., Feng S. et al. Effect of high intensity ultrasound on transglutaminase-catalyzed soy protein isolate cold set gel // Ultrasonics Sonochemistry. 2016. Vol. 29. Pp. 380–387. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.10.014.
31. Янова М.А. Влияние частоты ультразвука на изменение содержания белка при обогащении микроэлементами крупяных продуктов и муки // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2015. №40. С. 53–56.
32. Акинфеева А.В., Егорова Е.Ю., Цыганок С.Н. Влияние ультразвуковой обработки на характеристики модельных эмульсионных систем из высокобелкового растительного сырья // Южно-Сибирский научный вестник. 2020. №2(30). С. 73–79. https://doi.org/10.26456/vtchem2021.4.18.
33. Шагинова Л.О., Доморощенкова М.Л., Демьяненко Т.Ф., Крылова И.В. Влияние ультразвуковой обработки на экстрагируемость протеина при комплексной переработке семян подсолнечника // XI Конгресс молодых учёных: сборник научных трудов, Санкт-Петербург, 4–8 апреля 2022 года. СПб., 2022. С. 576–581.
34. Ожимкова Е.В., Орлов В.В. Ультразвуковая экстракция белковых комплексов из семян бобовых культур // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия. 2021. №4(46). С. 161–169. https://doi.org/10.26456/vtchem2021.4.18.
35. Tiwari B.K. Ultrasound: a clean, green extraction technology // TrAC Trends in Analytical Chemistry. 2015. Vol. 71. Pp. 100–109. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105202.
36. Zuñiga-Salcedo M.R., Ulloa J.A., Bautista-Rosales P.U. et al. Effect of ultrasound treatment on physicochemical, functional and nutritional properties of a safflower (*Carthamus tinctorius* L.) protein isolate // Italian Journal of Food Science. 2019. Vol. 31. Pp. 591–603. https://doi.org/10.14674/IJFS-1440.
37. Rodríguez Patino J.M., Pilosof A.M.R. Protein–polysaccharide interactions at fluid interfaces // Food Hydrocolloids. 2011. Vol. 25. Pp. 1925–1937. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.02.023.
38. Sha L., Koosis A.O., Wang Q., True A.D., Xiong Y.L. Interfacial dilatational and emulsifying properties of ultrasound-treated pea protein // Food Chemistry. 2021. Vol. 350. 129271. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129271.
39. Yan S., Xu J., Zhang S., Li Y. Effects of flexibility and surface hydrophobicity on emulsifying properties: ultrasound-treated soybean protein isolate // LWT. 2021. Vol. 142. 110881. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.110881.
40. Zhang T., Wang J., Feng J. et al. Ultrasonic pretreatment improves the gelation properties of low-salt *Penaeus vannamei* (*Litopenaeus vannamei*) surimi // Ultrasonics Sonochemistry. 2022. Vol. 86. 106031. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106031.
41. Khan Z.S., Sodhi N.S., Dhillon B., Dar B., Bakshi R.A., Shah S.F. Seabuckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.), a novel seed protein concentrate: isolation and modification by high power ultrasound and characterization for its functional and structural properties // Journal of Food Measurement and Characterization. 2021. Vol. 15. Pp. 4371–4379. https://doi.org/10.1007/s11694-021-01020-7.
42. de Oliveira A.P.H., Omura M.H., Barbosa É.D.A.A. et al. Combined adjustment of pH and ultrasound treatments modify techno-functionalities of pea protein concentrates // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2020. Vol. 603. 125156. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125156.
43. Jiang Q., Jin X., Lee S.-J., Yao S. Protein secondary structure prediction: a survey of the state of the art // Journal of Molecular Graphics and Modelling. 2017. Vol. 76. Pp. 379–402. https://doi.org/10.1016/j.jmgm.2017.07.015.
44. Wang J., Wang J., Kranthi Vanga S., Raghavan V. Influence of high-intensity ultrasound on the IgE binding capacity of Act d 2 allergen, secondary structure, and in-vitro digestibility of kiwifruit proteins // Ultrasonics Sonochemistry. 2021. Vol. 71. 105409. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105409.

45. Frydenberg R.P., Hammershøj M., Andersen U., Greve M.T., Wiking L. Protein denaturation of whey protein isolates (WPIs) induced by high intensity ultrasound during heat gelation // Food Chemistry. 2016. Vol. 192. Pp. 415–423. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.07.037.
46. Tian R., Feng J., Huang G. et al. Ultrasound driven conformational and physicochemical changes of soy protein hydrolysates // Ultrasonics Sonochemistry. 2020. Vol. 68. 105202. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105202.
47. Chandrapala J., Zisu B., Palmer M., Kentish S., Ashokkumar M. Effects of ultrasound on the thermal and structural characteristics of proteins in reconstituted whey protein concentrate // Ultrasonics Sonochemistry. 2011. Vol. 18. Pp. 951–957. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.12.016.
48. Vanga S.K., Wang J., Orsat V., Raghavan V. Effect of pulsed ultrasound, a green food processing technique, on the secondary structure and in-vitro digestibility of almond milk protein // Food Research International. 2020. Vol. 137. 109523. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109523.
49. Kadkhodaee R., Povey M.J.W. Ultrasonic inactivation of Bacillus α-amylase. I. effect of gas content and emitting face of probe // Ultrasonics Sonochemistry. 2008. Vol. 15. Pp. 133–142. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2007.02.005.
50. Kang D., Zou Y., Cheng Y., Xing L., Zhou G., Zhang W. Effects of power ultrasound on oxidation and structure of beef proteins during curing processing // Ultrasonics Sonochemistry. 2016. Vol. 33. Pp. 47–53. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.04.024.
51. Abadía-García L., Castaño-Tostado E., Ozimek L., Romero-Gómez S., Ozuna C., Amaya-Llano S.L. Impact of ultrasound pretreatment on whey protein hydrolysis by vegetable proteases // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2016. Vol. 37. Pp. 84–90. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.08.010.
52. Sengar A.S., Thirunavookarasu N., Choudhary P. et al. Application of power ultrasound for plant protein extraction, modification and allergen reduction – a review // Applied Food Research. 2022. Vol. 2. 100219. https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100219.
53. Aiello G., Pugliese R., Rueller L. et al. Assessment of the physicochemical and conformational changes of ultrasound-driven proteins extracted from soybean Okara byproduct // Food. 2021. Vol. 10. 562. https://doi.org/10.3390/foods10030562.
54. Cui Q., Wang L., Wang G., Zhang A., Wang X., Jiang L. Ultrasonication effects on physicochemical and emulsifying properties of *Cyperus esculentus* seed (tiger nut) proteins // LWT. 2021. Vol. 142. 110979. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.110979.
55. Zhu Z., Zhu W., Yi J. et al. Effects of sonication on the physicochemical and functional properties of walnut protein isolate // Food Research International. 2018. Vol. 106. Pp. 853–861. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.01.060.
56. Li W., Li S., Hu Y. et al. Impact of hot alkali modification conditions on secondary structure of peanut protein and embedding rate of curcumin // Food Science and Human Wellness. 2019. Vol. 8. Pp. 283–291. https://doi.org/10.1016/j.fshw.2019.05.004.
57. Jin J., Okagu O.D., Yagoub A.E.A., Udenigwe C.C. Effects of sonication on the in vitro digestibility and structural properties of buckwheat protein isolates // Ultrasonics Sonochemistry. 2021. Vol. 70. 105348. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105348.
58. Zhao C., Chu Z., Miao Z. et al. Ultrasound heat treatment effects on structure and acid-induced cold set gel properties of soybean protein isolate // Food Bioscience. 2021. Vol. 39. 100827. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100827.
59. Xiong T., Xiong W., Ge M., Xia J., Li B., Chen Y. Effect of high intensity ultrasound on structure and foaming properties of pea protein isolate // Food Research International. 2018. Vol. 109. Pp. 260–267. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.04.044.
60. Kalla-Bertholdt A.-M., Baier A.K., Rauh C. Influence of High-Intensity Ultrasound on Characteristics and Bioaccessibility of Pea Protein in Fiber-Enriched Suspensions // Foods. 2023. Vol. 12. 3160. https://doi.org/10.3390/foods12173160.
61. Loushigam G., Shanmugam A. Modifications to functional and biological properties of proteins of cowpea pulse crop by ultrasound-assisted extraction // Ultrasonics Sonochemistry. 2023. Vol. 97. 106448. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106448.
62. Яковченко Н.В., Попова Н.В. Влияние предварительной обработки сырья на функционально-технологические свойства растительного молока // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». 2023. Т. 11, №1. С. 46–54. https://doi.org/10.14529/food230105.
63. Li R., Xiong Y.L. Ultrasound-induced structural modification and thermal properties of oat protein // LWT. 2021. Vol. 149. 111861. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111861.
64. Li J., Dai Z., Che Z., Hao Y., Wang, S., Mao X. Improved gelling and emulsifying properties of myofibrillar protein from frozen shrimp (*Litopenaeus vannamei*) by high-intensity ultrasound // Food Hydrocolloids. 2023. Vol. 135. 108188. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108188.
65. Biswas B., Sit N. Effect of ultrasonication on functional properties of tamarind seed protein isolates // Journal of Food Science and Technology. 2020. Vol. 57. Pp. 2070–2078. https://doi.org/10.1007/s13197-020-04241-8.
66. Mir N.A., Riar C.S., Singh S. Structural modification of quinoa seed protein isolates (QPIs) by variable time sonification for improving its physicochemical and functional characteristics // Ultrasonics Sonochemistry. 2019. Vol. 58. 104700. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104700.
67. Malik M.A., Sharma H.K., Saini C.S. High intensity ultrasound treatment of protein isolate extracted from dephenolized sunflower meal: effect on physicochemical and functional properties // Ultrasonics Sonochemistry. 2017. Vol. 39. Pp. 511–519. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.05.026.

68. Shen X., Fang T., Gao F., Guo M. Effects of ultrasound treatment on physicochemical and emulsifying properties of whey proteins pre- and post-thermal aggregation // Food Hydrocolloids. 2017. Vol. 63. Pp. 668–676. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.10.003.
69. Shen X., Zhao C., Guo M. Effects of high intensity ultrasound on acid-induced gelation properties of whey protein gel // Ultrasonics Sonochemistry. 2017. Vol. 39. Pp. 810–815. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.05.039.
70. Xu G., Kang J., You W. et al. Pea protein isolates affected by ultrasound and NaCl used for dysphagia's texture-modified food: rheological, gel, and structural properties // Food Hydrocolloids. 2023. Vol. 139. 108566. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108566.
71. Yücetepe A., Saroğlu Ö., Özçelik B. Response surface optimization of ultrasound-assisted protein extraction from *Spirulina platensis*: investigation of the effect of extraction conditions on techno-functional properties of protein concentrates // Journal of Food Science and Technology. 2019. Vol. 56. Pp. 3282–3292. https://doi.org/10.1007/s13197-019-03796-5.
72. Omura M.H., De Oliveira A.P.H., Soares L.D.S. et al. Effects of protein concentration during ultrasonic processing on physicochemical properties and techno-functionality of plant food proteins // Food Hydrocolloids. 2021. Vol. 113. 106457. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106457.
73. Wang R., Wang L.-H., Wen Q.-H. et al. Combination of pulsed electric field and pH shifting improves the solubility, emulsifying, foaming of commercial soy protein isolate // Food Hydrocolloids. 2023. Vol. 134. 108049. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108049.
74. Yanjun S., Jianhang C., Shuwen Z. et al. Effect of power ultrasound pre-treatment on the physical and functional properties of reconstituted milk protein concentrate // Journal of Food Engineering. 2014. Vol. 124. Pp. 11–18. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.09.013.
75. Sheng L., Wang Y., Chen J., Zou J., Wang Q., Ma M. Influence of high-intensity ultrasound on foaming and structural properties of egg white // Food Research International. 2018. Vol. 108. Pp. 604–610. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.04.007.
76. Bi C., Chi S., Zhou T. et al. Effect of low-frequency high-intensity ultrasound (HIU) on the physicochemical properties of chickpea protein // Food Research International. 2022. Vol. 159. 111474. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111474.
77. Lo B., Kasapis S., Farahnaky A. Effect of low frequency ultrasound on the functional characteristics of isolated lupin protein // Food Hydrocolloids. 2022. Vol. 124. 107345. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107345.
78. Hu H., Wu J., Li-Chan E.C.Y. et al. Effects of ultrasound on structural and physical properties of soy protein isolate (SPI) dispersions // Food Hydrocolloids. 2018. Vol. 30. Pp. 647–655. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.08.001.
79. Jiang S., Ding J., Andrade J. et al. Modifying the physicochemical properties of pea protein by pH-shifting and ultrasound combined treatments // Ultrasonics Sonochemistry. 2017. Vol. 38. Pp. 835–842. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.03.046.
80. Lafarga T., Álvarez C., Bobo G., Aguiló-Aguayo. Characterization of functional properties of proteins from Ganxet beans (*Phaseolus vulgaris* L. var. Ganxet) isolated using an ultrasound-assisted methodology // LWT. 2018. Vol. 98. Pp. 106–112. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.08.033.
81. Khatkar A.B., Kaur A., Khatkar S.K. Restructuring of soy protein employing ultrasound: effect on hydration, gelation, thermal, in-vitro protein digestibility and structural attributes // LWT. 2020. Vol. 132. 109781. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109781.
82. Mao C., Wu J., Zhang X., Ma F., Cheng Y. Improving the solubility and digestibility of potato protein with an online ultrasound-assisted PH shifting treatment at medium temperature // Food. 2020. Vol. 9. 1908. https://doi.org/10.3390/foods9121908.
83. Pan M., Xu F., Wu Y. et al. Application of ultrasound-assisted physical mixing treatment improves in vitro protein digestibility of rapeseed napin // Ultrasonics Sonochemistry. 2020. Vol. 67. 105136. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105136.
84. Akharume F., Adedeji A. Effects of high-power ultrasound on the in vitro digestibility, physicochemical and functional properties of Proso millet prolamin and glutelin proteins // Journal of Food Measurement and Characterization. 2023. Vol. 17. Pp. 178–186. https://doi.org/10.1007/s11694-022-01619-4.
85. Thalía Flores-Jiménez N., Armando Ulloa J., Esmeralda Urías-Silvas J., Carmen Ramírez-Ramírez J., Ulises Bautista-Rosales P., Gutiérrez-Leyva R. Influence of high-intensity ultrasound on physicochemical and functional properties of a guamuchil *Pithecellobium dulce* (Roxb.) seed protein isolate // Ultrason Sonochem. 2022. Vol. 84. 105976. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.105976.
86. Prakash S., Bhandari B., Gaiani C. Engineering Plant-Based Food Systems. London, UK: Academic Press, 2022.

Поступила в редакцию 25 сентября 2023 г.

После переработки 2 ноября 2023 г.

Принята к публикации 6 июня 2024 г.

Burak L.Ch.[*], *Sapach A.N.* INFLUENCE OF ULTRASOUND ON THE FUNCTIONAL PROPERTIES OF PLANT PROTEINS. REVIEW OF THE SUBJECT FIELD

LLC "BELROSAKVA", Ponomarenko st., 35A, Minsk, 220015, Republic of Belarus, leonidburak@gmail.com

Introduction. Due to the increased interest of consumers in vegetarianism, plant proteins have become the focus of attention of the scientific community, the study of which is aimed at improving their nutritional and functional properties. The purpose of the article is to review the results of scientific research on the effect of ultrasonic technology on the physicochemical and functional properties of plant proteins.

Materials and methods. A search for scientific literature in Englishb and Russian on the study of the influence of ultrasonic technologies on the physicochemical and functional properties of plant proteins was carried out in the bibliographic databases "Scopus", "Web of Science", as well as other sources. The period 2010–2023 was adopted as the time frame for the review of scientific publications. When performing the work, scientific methods were used: searching and screening scientific literature, extracting data, analyzing, systematizing and summarizing them.

Results and its discussion. Numerous scientific studies have shown that ultrasound can cause significant changes in plant proteins, including denaturation and modification of their structures. These modifications can lead to improvements in the functional properties of proteins, such as water holding capacity, solubility, and viscosity. High-intensity ultrasound technology opens up great prospects for modifying the physicochemical properties of plant proteins. This method offers benefits such as energy efficiency, shorter processing times, and reduced or eliminated use of organic solvents. However, the use of high-intensity ultrasound in the processing of plant proteins also has certain disadvantages, including protein denaturation, the need for specialized equipment, and limitations in widespread industrial use.

Conclusions. Ultrasound is a promising technology for the modification of plant proteins, opening new opportunities for the development of innovative food ingredients and food products. The materials of this scientific review can be used for further research and practical application of ultrasound in the food industry for the effective use of plant proteins.

Keywords: vegetable protein, modification, ultrasound, functional properties, viscosity, solubility, hydrophobicity, denaturation, secondary structure.

For citing: Burak L.Ch., Sapach A.N. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2024, no. 4, pp. 5–23. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.20240413599.

References

1. Shokri S., Javanmardi F., Mohammadi M., Mousavi Khaneghah A. *Ultrason Sonochem*, 2022, vol. 83, 105938. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.105938.
2. Joshi S., Bathla S., Singh A., Sharma M., Stephen Inbaraj B., Sridhar K. *International Journal of Food Science & Technology*, 2023, vol. 58, pp. 785–794. https://doi.org/10.1111/ijfs.16233.
3. Valero-Cases E., Frutos M.J., Pérez-Llamas F. *International Journal of Food Science & Technology*, 2023, vol. 58(5), pp. 2325–2335. https://doi.org/10.1111/ijfs.16361.
4. Gharibzahedi S.M.T., Smith B. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, vol. 98, pp. 107–116. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.02.002.
5. Su J., Cavaco-Paulo A. *Ultrasonics sonochemistry*, 2021, vol. 1(76), 105653. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105653.
6. Ampofo J., Ngadi M. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022, vol. 84, 105955. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.105955.
7. Zou Y., Wang L., Li P. et al. *Process Biochemistry*, 2017, vol. 52, pp. 174–182. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2016.09.027.
8. Magalhães I.S., Guimarães A.D.B., Tribst A.A.L., Oliveira E.B.D., Leite Júnior B.R.D.C. *Food Research International*, 2022, vol. 157, 111310. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111310.
9. Pacheco A.F.C., De Souza L.B., Paiva P.H.C. *Applied Food Research*, 2023, vol. 3, 100281. https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100281.
10. Alarcon-Rojo A.D., Carrillo-Lopez L.M., Reyes-Villagrana R., Huerta-Jiménez M., Garcia-Galicia I.A. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, vol. 55, pp. 369–382. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.09.016.
11. Burak L. Ch., Yablonskaya V.V., Sapach A.N. *Modern Science and Innovations,* 2023, vol. 3, no. 43, pp. 141–155. https://doi.org/10.37493/2307-910X.2023.3.13.
12. Amiri A., Sharifian P., Soltanizadeh N. *International journal of biological macromolecules*, 2018, vol. 111, pp. 139–147. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.12.167.
13. Bhargava N., Mor R.S, Kumar K., Sharanagat V.S. *Ultrasonics sonochemistry*, 2021, vol. 70, 105293. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105293.
14. Burak L. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy,* 2022, no. 9, pp. 75–85. https://doi.org/10.17513/mjpfi.13444. (in Russ.).
15. Bezerra J.D.A., Sanches E.A., Lamarão C.V., Campelo P.H. *International Journal of Food Science & Technology*, 2022, vol. 57, pp. 4015–4026. https://doi.org/10.1111/ijfs.15774.
16. Sha L., Xiong Y.L. *Food Research International*, 2022, vol. 156, 111179. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111179.
17. Hussain M., Qayum A., Zhang X. et al. *LWT*, 2021, vol. 148, 111747. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111747.

[*] Corresponding author.

18. Figueroa-González J.J., Lobato-Calleros C., Vernon-Carter E.J., Aguirre-Mandujano E., Alvarez-Ramirez J., Martínez-Velasco A. *LWT*, 2022, vol. 153, 112561. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112561.
19. Jin J., Okagu O.D., Yagoub A.E.A., Udenigwe C.C. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, vol. 70, 105348. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105348.
20. Ngo N.T.T., Shahidi F. *Food Production. Processing and Nutrition*, 2021, vol. 3, p. 31. https://doi.org/10.1186/s43014-021-00076-8.
21. Cui L., Kimmel J., Zhou L., Chen B., Rao J. *Food Hydrocolloids*, 2021, vol. 113, 106534. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106534.
22. Li L., Zhou Y., Teng F. et al. *International Journal of Food Science & Technology*, 2020, vol. 55, pp. 1637–1647. https://doi.org/10.1111/ijfs.14428.
23. Lv S., Taha A., Hu H., Lu Q., Pan S. *Molecules*, 2019, vol. 24, 4260. https://doi.org/10.3390/molecules24234260.
24. Flores-Jiménez N.T., Ulloa J.A., Silvas J.E.U. et al. *Food Research International*, 2019, vol. 121, pp. 947–956. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.01.025.
25. Dabbour M., He R., Ma H., Musa A. *Journal of Food Process Engineering*, 2018, vol. 41, 12799. https://doi.org/10.1111/jfpe.12799.
26. Martínez-Velasco A., Lobato-Calleros C., Hernández-Rodríguez B.E., Román-Guerrero A., Alvarez-Ramirez J., Vernon-Carter E.J. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, vol. 44, pp. 97–105. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.02.007.
27. Nazari B., Mohammadifar M.A., Shojaee-Aliabadi S., Feizollahi E., Mirmoghtadaie L. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2018, vol. 41, pp. 382–388. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.10.002.
28. Resendiz-Vazquez J.A., Ulloa J.A., Urías-Silvas J.E. et al. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, vol. 37, pp. 436–444. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.01.042.
29. Zhang Q.-T., Tu Z.-C., Xiao H. et al. *Food and Bioproducts Processing*, 2014, vol. 92, pp. 30–37. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2013.07.006.
30. Zhang P., Hu T., Feng S. et al. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, vol. 29, pp. 380–387. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.10.014.
31. Yanova M.A. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2015, no. 40, pp. 53–56. (in Russ.).
32. Akinfeyeva A.V., Yegorova Ye.Yu., Tsyganok S.N. *Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik*, 2020, no. 2(30), pp. 73–79. https://doi.org/10.26456/vtchem2021.4.18. (in Russ.).
33. Shaginova L.O., Domoroshchenkova M.L., Dem'yanenko T.F., Krylova I.V. *XI Kongress molodykh uchonykh: sbornik nauchnykh trudov, Sankt-Peterburg, 4–8 aprelya 2022 goda*. [XI Congress of Young Scientists: collection of scientific papers, St. Petersburg, April 4–8, 2022]. St. Petersburg, 2022, pp. 576–581. (in Russ.).
34. Ozhimkova Ye.V., Orlov V.V. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiya*, 2021, no. 4(46), pp. 161–169. https://doi.org/10.26456/vtchem2021.4.18. (in Russ.).
35. Tiwari B.K. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2015, vol. 71, pp. 100–109. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105202.
36. Zuñiga-Salcedo M.R., Ulloa J.A., Bautista-Rosales P.U. et al. *Italian Journal of Food Science*, 2019, vol. 31, pp. 591–603. https://doi.org/10.14674/IJFS-1440.
37. Rodríguez Patino J.M., Pilosof A.M.R. *Food Hydrocolloids*, 2011, vol. 25, pp. 1925–1937. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.02.023.
38. Sha L., Koosis A.O., Wang Q., True A.D., Xiong Y.L. *Food Chemistry*, 2021, vol. 350, 129271. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129271.
39. Yan S., Xu J., Zhang S., Li Y. *LWT*, 2021, vol. 142, 110881. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.110881.
40. Zhang T., Wang J., Feng J. et al. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022, vol. 86, 106031. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106031.
41. Khan Z.S., Sodhi N.S., Dhillon B., Dar B., Bakshi R.A., Shah S.F. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2021, vol. 15, pp. 4371–4379. https://doi.org/10.1007/s11694-021-01020-7.
42. de Oliveira A.P.H., Omura M.H., Barbosa É.D.A.A. et al. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2020, vol. 603, 125156. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125156.
43. Jiang Q., Jin X., Lee S.-J., Yao S. *Journal of Molecular Graphics and Modelling*, 2017, vol. 76, pp. 379–402. https://doi.org/10.1016/j.jmgm.2017.07.015.
44. Wang J., Wang J., Kranthi Vanga S., Raghavan V. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, vol. 71, 105409. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105409.
45. Frydenberg R.P., Hammershøj M., Andersen U., Greve M.T., Wiking L. *Food Chemistry*, 2016, vol. 192, pp. 415–423. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.07.037.
46. Tian R., Feng J., Huang G. et al. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, vol. 68, 105202. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105202.
47. Chandrapala J., Zisu B., Palmer M., Kentish S., Ashokkumar M. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2011, vol. 18, pp. 951–957. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.12.016.
48. Vanga S.K., Wang J., Orsat V., Raghavan V. *Food Research International*, 2020, vol. 137, 109523. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109523.

49. Kadkhodaee R., Povey M.J.W. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2008, vol. 15, pp. 133–142. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2007.02.005.
50. Kang D., Zou Y., Cheng Y., Xing L., Zhou G., Zhang W. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, vol. 33, pp. 47–53. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.04.024.
51. Abadía-García L., Castaño-Tostado E., Ozimek L., Romero-Gómez S., Ozuna C., Amaya-Llano S.L. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2016, vol. 37, pp. 84–90. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.08.010.
52. Sengar A.S., Thirunavookarasu N., Choudhary P. et al. Applied Food Research, 2022, vol. 2, 100219. https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100219.
53. Aiello G., Pugliese R., Rueller L. et al. *Food*, 2021, vol. 10, 562. https://doi.org/10.3390/foods10030562.
54. Cui Q., Wang L., Wang G., Zhang A., Wang X., Jiang L. *LWT*, 2021, vol. 142, 110979. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.110979.
55. Zhu Z., Zhu W., Yi J. et al. *Food Research International*, 2018, vol. 106, pp. 853–861. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.01.060.
56. Li W., Li S., Hu Y. et al. *Food Science and Human Wellness*, 2019, vol. 8, pp. 283–291. https://doi.org/10.1016/j.fshw.2019.05.004.
57. Jin J., Okagu O.D., Yagoub A.E.A., Udenigwe C.C. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, vol. 70, 105348. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105348.
58. Zhao C., Chu Z., Miao Z. et al. *Food Bioscience*, 2021, vol. 39, 100827. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100827.
59. Xiong T., Xiong W., Ge M., Xia J., Li B., Chen Y. *Food Research International*, 2018, vol. 109, pp. 260–267. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.04.044.
60. Kalla-Bertholdt A.-M., Baier A.K., Rauh C. *Foods*, 2023, vol. 12, 3160. https://doi.org/10.3390/foods12173160.
61. Loushigam G., Shanmugam A. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2023, vol. 97, 106448. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106448.
62. Yakovchenko N.V., Popova N.V. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Pishchevyye i biotekhnologii»*, 2023, vol. 11, no. 1, pp. 46–54. https://doi.org/10.14529/food230105.
63. Li R., Xiong Y.L. *LWT*, 2021, vol. 149, 111861. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111861.
64. Li J., Dai Z., Che Z., Hao Y., Wang, S., Mao X. *Food Hydrocolloids*, 2023, vol. 135, 108188. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108188.
65. Biswas B., Sit N. *Journal of Food Science and Technology*, 2020, vol. 57, pp. 2070–2078. https://doi.org/10.1007/s13197-020-04241-8.
66. Mir N.A., Riar C.S., Singh S. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, vol. 58, 104700. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104700.
67. Malik M.A., Sharma H.K., Saini C.S. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, vol. 39, pp. 511–519. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.05.026.
68. Shen X., Fang T., Gao F., Guo M. *Food Hydrocolloids*, 2017, vol. 63, pp. 668–676. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.10.003.
69. Shen X., Zhao C., Guo M. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, vol. 39, pp. 810–815. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.05.039.
70. Xu G., Kang J., You W. et al. *Food Hydrocolloids*, 2023, vol. 139, 108566. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108566.
71. Yücetepe A., Saroğlu Ö., Özçelik B. *Journal of Food Science and Technology*, 2019, vol. 56, pp. 3282–3292. https://doi.org/10.1007/s13197-019-03796-5.
72. Omura M.H., De Oliveira A.P.H., Soares L.D.S. et al. *Food Hydrocolloids*, 2021, vol. 113, 106457. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106457.
73. Wang R., Wang L.-H., Wen Q.-H. et al. *Food Hydrocolloids*, 2023, vol. 134, 108049. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108049.
74. Yanjun S., Jianhang C., Shuwen Z. et al. *Journal of Food Engineering*, 2014, vol. 124, pp. 11–18. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.09.013.
75. Sheng L., Wang Y., Chen J., Zou J., Wang Q., Ma M. *Food Research International*, 2018, vol. 108, pp. 604–610. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.04.007.
76. Bi C., Chi S., Zhou T. et al. *Food Research International*, 2022, vol. 159, 111474. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111474.
77. Lo B., Kasapis S., Farahnaky A. *Food Hydrocolloids*, 2022, vol. 124, 107345. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107345.
78. Hu H., Wu J., Li-Chan E.C.Y. et al. *Food Hydrocolloids*, 2018, vol. 30, pp. 647–655. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.08.001.
79. Jiang S., Ding J., Andrade J. et al. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, vol. 38, pp. 835–842. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.03.046.
80. Lafarga T., Álvarez C., Bobo G., Aguiló-Aguayo. *LWT*, 2018, vol. 98, pp. 106–112. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.08.033.
81. Khatkar A.B., Kaur A., Khatkar S.K. *LWT*, 2020, vol. 132, 109781. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109781.
82. Mao C., Wu J., Zhang X., Ma F., Cheng Y. *Food*, 2020, vol. 9, 1908. https://doi.org/10.3390/foods9121908.
83. Pan M., Xu F., Wu Y. et al. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2020, vol. 67, 105136. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105136.

84. Akharume F., Adedeji A. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2023, vol. 17, pp. 178–186. https://doi.org/10.1007/s11694-022-01619-4.
85. Thalía Flores-Jiménez N., Armando Ulloa J., Esmeralda Urías-Silvas J., Carmen Ramírez-Ramírez J., Ulises Bautista-Rosales P., Gutiérrez-Leyva R. *Ultrason Sonochem*., 2022, vol. 84, 105976. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.105976.
86. Prakash S., Bhandari B., Gaiani C. *Engineering Plant-Based Food Systems*. London, UK: Academic Press, 2022.

Received September 25, 2023

Revised November 2, 2023

Accepted June 6, 2024

Сведения об авторах

Бурак Леонид Чеславович – кандидат технических наук, директор, leonidburak@gmail.com

Сапач Александр Николаевич – инженер-химик, sapabra7@gmail.com

Information about authors

Burak Leonid Cheslavovich – candidate of technical sciences, director, leonidburak@gmail.com

Sapach Alexander Nikolaevich – chemical engineer, sapabra7@gmail.com