ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-2-2510
https://elibrary.ru/HYJQCX

Обзорная статья
https://fptt.ru

Эффективность комбинированного воздействия ультразвука и микроволн при обработке пищевых продуктов. Обзор

Л. Ч. Бурак[1,*], А. П. Завалей[2]

[1] *ООО «Белросаква», Минск, Республика Беларусь*

[2] *СООО «Ароматик», Дзержинск, Республика Беларусь*

Поступила в редакцию: 18.08.2023
Принята после рецензирования: 14.10.2023
Принята к публикации: 07.11.2023

**Л. Ч. Бурак: leonidburak@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-6613-439X*
А. П. Завалей: https://orcid.org/0000-0002-6565-5927

© Л. Ч. Бурак, А. П. Завалей, 2024

Аннотация.
Современные методы обработки пищевых продуктов на основе ультразвукового и микроволнового излучения находят широкое применение в пищевой промышленности. Цель исследования заключалась в анализе, систематизации и обобщении результатов научных публикаций по использованию комбинированных микроволново-ультразвуковых технологий для обработки пищевых продуктов.
Объектом исследования являлась научная литература на английском языке. Поиск проводили в библиографических базах Scopus и Web of Science, а также в других источниках. В качестве временных рамок для обзора научных публикаций приняли период 2010–2023 гг. Использовали такие научные методы, как поиск и скрининг научной литературы, извлечение данных, их анализ, систематизация и обобщение.
Проанализировали 85 научные статьи по использованию комбинированных микроволново-ультразвуковых технологий для обработки пищевых продуктов. Рассмотрели принципы и характеристики ультразвуковых и микроволновых методов обработки пищевых продуктов, их комбинирование, конструкцию оборудования и применение в обработке сырья и пищевых продуктов, таких как размораживание, сушка, экстракция и стерилизация. Под воздействием микроволн происходит увеличение скорости нагрева обрабатываемого продукта, а ультразвук повышает эффективность тепломассопереноса. Результаты исследования доказывают эффективность комбинированной обработки за счет сокращения времени обработки, улучшения качества продукции, стимулирования оттока влаги и улучшения равномерности микроволнового нагрева. Комбинированное воздействие микроволн и ультразвука повышает эффективность обработки, способствуя максимальному сохранению пищевой ценности и качества продукта. Ультразвуковая технология как вспомогательное средство эффективного микроволнового нагрева не загрязняет окружающую среду, она высокоэффективна и имеет широкий спектр применения в пищевой промышленности.
Результаты обзора могут быть использованы при проведении дальнейших исследований по оптимизации процессов экстракции, сушки, размораживания и стерилизации, а также специалистами пищевой промышленности при выборе оптимальных способов обработки пищевых продуктов.

Ключевые слова. Пищевые продукты, ультразвук, микроволны, обработка, размораживание, сушка, стерилизация, экстракция

Финансирование. Работа выполнена на базе Общества с ограниченной ответственностью «Белросаква» (ООО «Белросаква»).

Для цитирования: Бурак Л. Ч., Завалей А. П. Эффективность комбинированного воздействия ультразвука и микроволн при обработке пищевых продуктов. Обзор // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54. № 2. С. 342–357. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-2-2510

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-2-2510
https://elibrary.ru/HYJQCX

Review article
Available online at https://fptt.ru/en

Combined Ultrasound and Microwave Food Processing: Efficiency Review

Leonid Ch. Burak[1,*], Andrey P. Zavaley[2]

[1] Belrosakva LLC, Minsk, Republic of Belarus

[2] Aromatic JLLC, Dzherzhinsk, Republic of Belarus

Received: 18.08.2023
Revised: 14.10.2023
Accepted: 07.11.2023

*Leonid Ch. Burak: leonidburak@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-6613-439X
Andrey P. Zavaley: https://orcid.org/0000-0002-6565-5927

© L.Ch. Burak, A.P. Zavaley, 2024

Abstract.
Modern methods of food processing combine ultrasonic and microwave treatment. This article reviews scientific publications on combined microwave and ultrasound technologies in food processing.
The review involved standard methods of data analysis and covered 85 Scopus and Web of Science research papers on combined microwave and ultrasonic food treatment published in English in 2010–2023.
The article describes the principles and specific features of ultrasonic and microwave food processing methods, their combinations, equipment design, and applications as part of various food processing stages, e.g., defrosting, drying, extraction, sterilization, etc. Microwaves increase the heating rate while ultrasound increases the efficiency of heat and mass transfer. Their combined use reduces processing time, improves product quality, facilitates moisture drainage, and provides uniform heating. The combined effect of microwaves and ultrasound increases the processing efficiency, thus preserving the nutritional value and quality of the final product. Ultrasonic technology serves as an aid to efficient and environmentally-friendly microwave heating, which has a wide range of applications in the food industry.
The review can be used in further research in extraction, drying, defrosting, and sterilization. It can help food industry specialists to select optimal food processing methods.

Keywords. Food products, ultrasound, microwaves, processing, defrosting, drying, sterilization, extraction

Funding. The research was performed on the premises of Belrosakva LLC.

For citation: Burak LCh, Zavaley AP. Combined Ultrasound and Microwave Food Processing: Efficiency Review. Food Processing: Techniques and Technology. 2024;54(2):342–357. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-2-2510

Введение

Информация об использовании натуральных продуктов, отсутствии химических консервантов и применении современных технологий переработки, которые позволяют сохранить пищевую ценность продукта, свежий вкус и аромат, привлекает потребителей и определяет их покупательскую способность. Метод обработки пищевых продуктов должен быть экологичным, безопасным и эффективным для производства пищевых продуктов улучшенного качества с точки зрения приемлемости и пищевой ценности. Среди широкого спектра разработанных методов перспективными являются методы обработки на основе микроволнового и ультразвукового излучения [1–3]. В последнее десятилетие было опубликовано много исследовательских работ по размораживанию, сушке, жарке и стерилизации пищевых продуктов, а также экстракции ингредиентов с использованием микроволновых и ультразвуковых методов [4].

Ультразвуковые волны, используемые в пищевой промышленности, можно разделить на классы низкой и высокой интенсивности. Ультразвуковые волны низкой интенсивности или высокой частоты имеют частоту более 100 кГц и интенсивность менее 1 Вт/см^2. Они определяются как диагностические волны из-за их способности оценивать структуру и физико-химические свойства пищевого продукта как во время обработки, так и хранения [5]. Высокоинтенсивные и низкочастотные ультразвуковые волны имеют частотный диапазон от 20 до 100 кГц, а интенсивность от 10 до 1000 Вт/см^2.

В отличие от низкоинтенсивного волнового излучения ультразвуковое излучение вызывает изменения физических, биохимических и механических свойств пищевых продуктов [6]. Взаимодействие между ультразвуковыми волнами и средой приводит к возникновению тепловых, механических и кавитационных эффектов. Ультразвуковые волны передаются через вибрацию

материала, во время которой энергия непрерывно поглощается материалом и выделяет большое количество тепла. Механический эффект способствует образованию эмульсий, разжижению гелей или диспергированию твердых частиц. Радиационное давление ультразвуковых волн сжимает и растягивает пищевой материал, что вызывает его непрерывную усадку или расширение. Эффект кавитации наблюдается при обработке жидких пищевых продуктов или пищевых продуктов с высоким содержанием влаги ультразвуковыми волнами. В этих материалах во время ультразвуковой обработки образуются пузырьки воздуха. Эти пузырьки набухают и сжимаются, когда ультразвуковое акустическое давление положительно или отрицательно во время распространения ультразвуковых волн соответственно. В течение нескольких циклов пузырьки увеличивают свой объем, пока не лопнут с выделением энергии [6, 7].

Микроволны – это электромагнитные волны с длиной волны в диапазоне от 1 мм до 1 м. Когда пищевые продукты обрабатываются микроволновым излучением, то материал поглощает микроволновую энергию и преобразует ее в тепловую энергию посредством миграции ионов и вращения дипольных молекул. То есть полярные молекулы продукта, особенно воды, диэлектрически поляризуются переменными микроволновыми электромагнитными полями. Из-за частого изменения направления электромагнитного поля полярные молекулы быстро вращаются. Это вызывает столкновение и трение между этими молекулами, тем самым выделяя тепло. Положительные и отрицательные ионы перестраиваются в зависимости от направления изменения электромагнитного поля [9]. Сегодня микроволновая обработка используется в пищевой промышленности для таких целей, как нагрев, размораживание, сушка и стерилизация [9–12]. Во время микроволновой обработки пищевых продуктов микроволны генерируются двигателем, таким как полупроводниковое микроволновое устройство или магнетрон. Затем эти микроволны передаются по волноводу и воздействуют на пищевой материал. Микроволны не требуют среды передачи, что снижает потери энергии. Сегодня микроволны с частотами 2450 и 915 МГц используются в промышленности, науке и медицине. Благодаря таким преимуществам, как незначительные потери энергии при передаче, высокая проникающая способность и способность передавать достаточное количество энергии для нагрева пищевых материалов, микроволновую технологию применяют для обработки продуктов питания. Недостатком обработки микроволнами является неравномерность нагрева. По этой причине микроволновую обработку пищевых продуктов используют в комбинации с другими методами, такими как ультразвуковая обработка. Когда пища обрабатывается этими методами одновременно, то микроволновая и ультразвуковая энергия выделяют тепло и способствуют тепло- и массопереносу [13]. Результаты исследований доказывают синергетическую эффективность обработки за счет сокращения времени обработки, улучшения качества продукции, стимулирования оттока влаги и улучшения равномерности микроволнового нагрева. В последнее десятилетие во многих исследованиях сообщается о синергическом эффекте микроволновых и ультразвуковых методов при размораживании, сушке, обжаривании, извлечении пищевых ингредиентов и обработке жидких пищевых продуктов [14–16].

Цель статьи – обзор научных исследований в области комбинированных микроволново-ультразвуковых технологий для обработки пищевых продуктов, включая размораживание, сушку, экстракцию и обработку жидких пищевых продуктов, а также изучение влияния комбинированных микроволново-ультразвуковых методов на обработку пищевого сырья и качество конечных продуктов. Эта статья призвана предоставить будущим исследователям информацию о разработке новых методов обработки пищевых продуктов, основанных на сочетании микроволновых и ультразвуковых методов.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являлись 85 статьи. Поиск научной литературы на английском языке по использованию комбинированных микроволново-ультразвуковых технологий для обработки пищевых продуктов проводили в библиографических базах Scopus и Web of Science, а также в других источниках. В качестве временных рамок для обзора научных публикаций был приняли период 2010–2023 гг. При выполнении работы использовали такие научные методы, как поиск и скрининг научной литературы, извлечение данных, их анализ, систематизация и обобщение. При отборе публикаций для обзора приоритет отдавали высокоцитируемым источникам. Для обзора предметного поля проведенного исследования использовали алгоритм в соответствии с протоколом PRIZMA. Составили схему проведения исследования.

Критерии включения и исключения источников. Для поисковых запросов в зарубежных базах данных Scopus и Web of Science использовали следующие ключевые слова и словосочетания на английском языке: food products, method, ultrasound, microwaves, processing, defrosting, drying, sterilization, extraction.

Критерии включения и исключения для статей, подлежащих анализу, были следующими. Критерии включения: статья написана в период 2010–2023 гг.; статья соответствует теме исследования; типы анализируемых статей – оригинальные исследовательские статьи, обзорные статьи, краткие отчеты. Критерии исключения: статья не соответствует теме данного обзора: не касается тематики комбинированных микроволново-ультразвуковых технологий для обработки пищевых продуктов, включая размораживание, сушку, экстракцию и обработку жидких пищевых продуктов, а также влияния комбинированных микроволново-ультразвуковых методов на обработку пищевого сырья и качество конечных продуктов; статья написана не на английском языке; содержание статьи дублируется. Если из разных

баз данных или электронных библиотечных систем были извлечены повторяющиеся источники, то их классифицировали только один раз.

Анализ и систематизация данных. Результаты анализа были представлены в виде таблиц и диаграмм для визуализации данных. Для обзора предметного поля проведенного исследования использовали алгоритм в соответствии с протоколом PRIZMA (https://www.acpjournals.org/doi/10.7326/M18-0850) и составили схему проведения исследования (рис. 1).

Результаты и их обсуждение

Ультразвуковая и микроволновая техника размораживания. Пищевые продукты замораживают для хранения и транспортировки, а затем подвергают разморозке перед употреблением. Метод размораживания влияет на качество размороженных продуктов, а именно на пищевую ценность и текстуру. Обычно пищевые продукты размораживают на воздухе, в воде, вакууме, холодильнике и т. д. Однако эти процессы могут привести к потере влаги, деградации питательных веществ и снижению водоудерживающей способности пищевого материала. Пищевые продукты могут быть заражены пищевыми микроорганизмами в результате длительного процесса оттаивания [17].

Микроволновая обработка может повысить эффективность размораживания пищевых продуктов. Микроволновая энергия поглощается замороженным материалом и преобразуется в тепло. Это сводит к минимуму потери энергии во время обработки и эффективно сокращает время оттаивания. Микроволновая обработка также инактивирует пищевые микроорганизмы, изменяя структуру их белков. Однако, как установлено в ходе исследований, при использовании только микроволновой энергии во время оттаивания замороженных продуктов происходит неконтролируемый нагрев продуктов и термическая денатурация белков [18–20].

Замороженные пищевые продукты также можно размораживать ультразвуковой обработкой на водяной бане. Физическое воздействие ультразвука может повышать температуру воды и создавать высокоскоростные струи во время процесса ультразвукового оттаивания. Затем эти высокоскоростные струи вызывают схлопывание пузырьков воздуха в воде для улучшения теплопередачи. Поэтому процесс размораживания ускоряется, что положительно влияет на качество пищи. Благодаря разработке и оптимизации процесса ультразвукового оттаивания замороженные пищевые продукты можно размораживать равномерно. Плохая проницаемость ультразвуковых волн, длительное время оттаивания и высокие энергозатраты являются недостатками этого метода и препятствуют его широкому применению [21–23].

На сегодняшний день были разработаны методы оттаивания, которые сочетают микроволновую и ультразвуковую энергию. Эта комбинация повышает эффективность метода ультразвукового оттаивания и позволяет избежать неравномерного нагрева и/или перегрева, вызванного методом микроволнового оттаивания [24, 25].

Конструкция оборудования для ультразвукового и микроволнового размораживания. Для развития технологии комбинированной микроволново-ультразвуковой разморозки исследователи пытаются разработать более инновационное и многофункциональное оборудование для комбинированного микроволново-ультразвукового оттаивания. Принципиальная схема оборудования для ультразвукового и микроволнового

Рисунок 1. Блок-схема, которая описывает процесс выбора исследования в соответствии с протоколом PRISMA

Figure 1. PRISMA protocol for research selection

оттаивания, разработанная L. Cai и др., состоит из томографической камеры, системы микроволнового нагрева, ультразвуковой системы и системы управления [15]. В томографическую камеру с температурой 4 °C помещали ультразвуковой очиститель и микроволновый генератор. Затем ёмкость с замороженными продуктами помещали в ультразвуковой очиститель. Этот контейнер был изготовлен из полиэтилена, который является неполярным изоляционным материалом с низкой термостойкостью и низкими диэлектрическими потерями. Во время оттаивания замороженных продуктов микроволновый магнетрон работал на частоте 2450 МГц над ультразвуковым очистителем, а положение отверстия для микроволнового излучения регулировалось в соответствии с положением контейнера. Датчик температуры был вставлен в центр продукта для контроля его температуры в режиме реального времени во время оттаивания [15].

Размораживание продуктов с использованием метода ультразвукового и микроволнового размораживания. Результаты исследований свидетельствуют о повышении эффективности размораживания и улучшении качества размороженных продуктов с точки зрения свежести, белковой структуры, микроструктуры и стабильности липидов в пищевых продуктах, размороженных с использованием метода размораживания в микроволновой печи с помощью ультразвука. С помощью этого нового метода L. Cai и др. размораживали филе окуня и красной барабанной рыбы [15, 24]. По сравнению с филе, размороженным с использованием методов микроволнового и ультразвукового оттаивания, филе, размороженное с помощью комбинированной технологии ультразвукового и микроволнового оттаивания, показало улучшенное удержание внутриклеточной воды. Совместное использование ультразвукового и микроволнового оттаивания привело к меньшему повреждению ткани мышечных волокон и нежелательным изменениям структуры белка во время оттаивания. Благодаря повышенной эффективности размораживания произошло ингибирование процесса окисления липидов. Результаты органолептического анализа показали, что свежесть филе, размороженного с помощью ультразвукового и микроволнового размораживания, была схожа с показателями свежей рыбы. M.-M. Zhu и др. в ходе исследования установили, что свинина, размороженная с помощью комбинированного микроволнового и ультразвукового метода, показала более высокую растворимость белка, чем свинина, полученная путем размораживания в микроволновой печи. Это свидетельствует об улучшении качества размороженного мяса [26].

Ультразвуковая и микроволновая сушка. Микроволновая сушка – это сушка с диэлектрическим нагревом. Она является одним из наиболее эффективных доступных методов сушки благодаря объемному нагреву материалов. Технология микроволновой сушки применяется для сушки фруктов и овощей, зерна, мяса и других продуктов, которым необходимо продлить срок хранения [27–29]. Хотя метод микроволновой сушки имеет преимущество высокой сушки и энергоэффективности, этот метод связан с неравномерной сушкой и локальным перегревом/обугливанием пищевых материалов. Для решения этой проблемы был внедрен ультразвуковой метод, поскольку кавитация и механическое воздействие ультразвуковых волн могут эффективно снизить сопротивление диффузии влаги, улучшить тепло- и массообменную способность и свести к минимуму неравномерный нагрев [30]. Пищевое сырье либо предварительно обрабатывают ультразвуковыми волнами с последующей сушкой в микроволновой печи, либо высушивают при комбинированном воздействии ультразвуковой и микроволновой энергии. Предварительная ультразвуковая обработка может выполняться либо в ультразвуковой ванне, либо в ультразвуковом аппарате на основе зонда [31, 32]. Ультразвуковая ванна чаще используется исследователями, т. к. после обработки и последующей сушки сушеное сырье имеет большую однородность по сравнению с использованием ультразвукового зонда.

Влияние микроволновой сушки с ультразвуковой предварительной обработкой на качество сушеных продуктов. *Цвет.* Ультразвуковая обработка образцов пищевых продуктов перед микроволновой сушкой может улучшить цветовой профиль конечных высушенных продуктов. По сравнению с исходными пищевыми продуктами перед сушкой краснота/зеленость (a^*), синева/желтизна (b^*) и общее изменение цвета (ΔE) продуктов, высушенных в микроволновой печи, увеличиваются из-за ферментативных и неферментативных реакций потемнения [33]. В процессе применения ультразвуковой-микроволновой сушки (УЗМС) более короткое время сушки и ее более низкая температура подавляют реакции потемнения [34]. Y. Zhao и др. сообщили об эффективности сохранения цвета высушенных семян лотоса при использовании комбинированного метода ультразвуковой-микроволновой сушки по сравнению с высушиванием только в микроволновой печи [34]. Увеличение мощности и времени ультразвуковой обработки негативно влияло на цвет из-за повреждения клеточной структуры и высвобождения пигмента [28, 35].

Пищевая ценность. Содержание питательных веществ в высушенных образцах является решающим параметром качества для оценки пригодности методов сушки. Восприимчивые биологически активные соединения в пище, такие как фенолы, флавоноиды и антоцианы, легко разлагаются во время сушки в микроволновой печи [30]. Благодаря использованию предварительной обработки ультразвуком время микроволновой сушки пищевых материалов сокращается, что может уменьшить окислительную деградацию этих соединений. Ультразвуковая обработка разрушает клеточную структуру в образцах пищевых продуктов, способствуя высвобождению активного вещества из

клеток во время экстракции. Следовательно, предварительная ультразвуковая обработка может увеличить содержание этих соединений за счет повышения эффективности их экстракции [36]. L. Li и др. установили, что комбинированный метод ультразвуковой-микроволновой сушки увеличивает общее содержание фенолов и флавоноидов в батате на 29,03 и 29,73 % соответственно по сравнению с бататом, высушенным в микроволновой печи [37]. Однако противоположная тенденция была установлена в исследовании L. Li и др., где содержание фенольных, флавоноидных и антоциановых активных веществ в фасоли, высушенной УЗМС, было ниже, чем в фасоли, высушенной в микроволновой печи [28]. Это произошло потому, что предварительная обработка ультразвуком способствовала высвобождению, растворению и потере этих соединений в ультразвуковой водяной ванне. Предварительная обработка ультразвуком может способствовать протеолизу. Об этом свидетельствуют результаты сушки семян лотоса, высушенные комбинированным методом ультразвуковой-микроволновой сушки, где определено более высокое содержание свободных аминокислот, чем у семян, высушенных в микроволновой печи [38]. Результаты некоторых исследований влияния предварительной обработки ультразвуком на качество продуктов, высушенных в микроволновой печи, представлены в таблице 1.

Технологический процесс комбинированной ультразвуковой-микроволновой сушки. Для сушки пищевого сырья и продуктов разработано различное оборудование, сочетающее ультразвуковую и микроволновую энергию. Ультразвуковая-микроволновая сушилка состоит из системы ультразвуковой обработки (частота > 20 кГц), микроволновой системы (частота 2450 МГц), сушильной камеры и системы управления [13, 14, 50]. В этих конструкциях используется бесконтактная система ультразвуковой обработки, где в качестве среды передачи используется воздух, чтобы избежать эрозии и загрязнения пищевых материалов. Мощность ультразвука и микроволн можно регулировать отдельно с помощью системы программируемого логического контроллера [51]. В качестве примеров исследований результатов комбинированной ультразвуковой-микроволновой сушки можно привести работы по сушке ломтиков яблок, *Tremella fuciformis*, семян лотоса, малины и зеленого перца [2, 13, 52–54]. Процесс комбинированной сушки показал эффективное действие на качественные показатели сушеной продукции, сохранение цвета и пищевой ценности.

В процессе комбинированной ультразвуковой-микроволновой сушки под действием микроволновой энергии продукт нагревается, а высокочастотный ультразвук способствует удалению влаги, что улучшает тепло- и массообмен материалов при сушке и ускоряет ее [52]. В исследовании J. Xu и др. в ходе комбинированной ультразвуковой-микроволновой сушки *T. fuciformis* было снижено время на 42,86 %, по сравнению с методом микроволновой сушки и предварительной обработкой ультразвуком, а эффективный коэффициент диффузии влаги увеличился с $1{,}72\times10^{-5}$ до $2{,}28\times10^{-5}$ м^2/с [13]. Когда мощность микроволн постоянна, то увеличение мощности ультразвука может повысить эффективность сушки за счет снижения сопротивления массопереносу в пищевых материалах как на поверхности, так и на их внутренних участках при повышенной мощности ультразвука. Результаты исследования сушки яблок, высушенных различными методами сушки, показали, что время сушки УЗМС сократилось на 29,8 % по сравнению со временем сушки в микроволновой печи [54].

Сокращение времени сушки пищевого сырья комбинированной ультразвуковой-микроволновой сушкой способствует сохранению цвета и структуры, что подтверждалось при сушке яблок и перца [2, 14, 50]. Однако противоположная тенденция была отмечена S. J. Kowalski и др. [54]. Авторы заметили, что процесс комбинированной ультразвуковой-микроволновой сушки вызвал относительно высокую усадку ягод малины из-за изменения их структуры под действием микроволнового излучения.

Пищевые продукты, высушенные с использованием комбинированного метода ультразвуковой-микроволновой сушки, сохранили исходное содержание многих питательных веществ. Сокращение времени сушки способствует снижению разрушения и окисления питательных веществ. Lei и др. установили, что метод комбинированной ультразвуковой-микроволновой сушки снизил потери общего количества сахаров, фенолов и общего количества антиоксидантов в сушеных грибах. Аналогичные результаты были получены J. Xu и др., где процесс сушки комбинированным методом ультразвуковой-микроволновой сушки позволил сохранить содержание сахаров и белка [13]. В исследовании J. Szadzinska и др. содержание витамина С в зеленом перце, высушенном с помощью комбинированной ультразвуковой-микроволновой сушки, было увеличено на 19,6 % по сравнению с высушенным в микроволновой печи [2]. Однако мощность ультразвуковой и микроволновой энергии в процессе комбинированной ультразвуковой-микроволновой сушки должна быть оптимизирована, чтобы избежать разрушения биоактивных соединений под тепловым воздействием ультразвука и микроволн. В исследовании авторов J. Zhang и др., когда мощность ультразвука была увеличена с 200 до 300 Вт, общее содержание фенолов и флавоноидов в сушеных китайских орехах гикори, высушенных комбинированной ультразвуковой-микроволновой сушкой, снизилось до 11,9 мг GAE/г DW и с 12,4 до 9,7 мг GAE/г DW соответственно [30].

Ультразвуковая и микроволновая экстракция (УЗМЭ). Комбинированный метод ультразвуковой-микроволновой экстракции способствует улучшению процесса извлечения пищевых ингредиентов за счет сочетания преимуществ методов микроволновой и ультразвуковой экстракции, таких как быстрый нагрев и улучшенный тепло- и массоперенос. Повышение

Таблица 1. Влияние предварительной обработки ультразвуком на качество продуктов, высушенных в микроволновой печи

Table 1. Effect of ultrasonic pre-treatment on the quality of microwave-dried products

Наименование сырья	Вид ультразвука	Параметры обработки ультразвуком	Время предварительной обработки, мин	Метод сушки	Мощность микроволн	Основные результаты	Источник
Семена лотоса (*Nelumbo*)	Ультразвуковой зонд	0,29, 0,40 и 0,51 Вт/мл	10	Микроволновая вакуумная сушка	15 Вт/г	Температура стеклования и содержание аминокислот в предварительно обработанных ультразвуком семенах лотоса могут быть увеличены. Температура желатинизации и ферментативное потемнение снизились	[38]
Томат (*Solanum lycopersicum*)	Ультразвуковая водяная баня	0,011 Вт/мл	0, 20 и 40	Сушка горячим воздухом в микроволновой печи	120, 150 и 180 Вт	Предварительно обработанные ультразвуком ломтики помидоров показали повышенную регидратационную способность и увеличенное содержание ликопина, общего фенола и витамина С	[35]
Картофель (*Solanum tuberosum*)	Ультразвуковая водяная баня	40 кГц	0, 10, 20 и 30	Сушка горячим воздухом в микроволновой печи	360, 600 и 900 Вт	Процесс предварительной обработки ультразвуком может сократить время сушки. Значение эффективного коэффициента диффузии влаги (D_{eff}) высушенного образца увеличивалось с повышением времени ультразвуковой обработки	[39]
Морковь (*Daucus carota* subsp. *sativus*)	Ультразвуковая водяная баня	180 Вт, 21 кГц, 250 Вт, 24 кГц	20	Сушка горячим воздухом в микроволновой печи	200 Вт	Предварительная ультразвуковая обработка помогла улучшить кинетику сушки горячим воздухом в микроволновой печи и качество моркови, а также снизить степень потери каротиноидов	[40]
Сладкий картофель (*Ipomoea batatas*)	Ультразвуковая водяная баня	25 кВт/м^3, 40 кГц	30	Микроволновая вакуумная сушка	22 Вт/г	Сладкий картофель сушили в соответствии с процессом вакуумной сушки с помощью ультразвука. Были достигнуты высокая скорость расширения, меньшая цветовая разница и степень повреждения клеток. Эффективность сушки может быть повышена	[41]
Закуски из клюквы (*Vaccinium oxycoccus*)	Ультразвуковая водяная баня	180 Вт, 21 кГц	30	Микроволновая вакуумная сушка	150 Вт	Процесс предварительной ультразвуковой обработки не улучшил кинетику сушки клюквенных снеков. Предварительно обработанные ультразвуком образцы показали лучший внешний вид и более высокую антиоксидантную активность, чем необработанные образцы	[42]
Клубника (*Fragaria* × *ananassa*)	Ультразвуковая водяная баня	180, 240 и 300 Вт	15	Сублимация в микроволновой печи	1,5–2,5 Вт/г	Различные проникающие растворы показали разный эффект высыхания. Ультразвуковая предварительная обработка помогла повысить эффективность сушки и питательную ценность сублимированной клубники, а также улучшить текстуру	[43]

Продолжение таблицы 1.

Наименование сырья	Вид ультразвука	Параметры обработки ультразвуком	Время предварительной обработки, мин	Метод сушки	Мощность микроволн	Основные результаты	Источник
Листья петрушки (*Petroselinum crispum*)	Ультразвуковая водяная баня	300 Вт, 21 кГц	20	Конвективная сушка в микроволновой печи	100 и 300 Вт	Процесс предварительной ультразвуковой обработки положительно повлиял на кинетику сушки, энергозатраты, содержание хлорофилла и лютеина, а также на цвет листьев петрушки, высушенных в микроволновой печи	[44]
Клюква (*Vaccinium oxycoccus*)	Ультразвуковая водяная баня	35 и 130 кГц	10–80	Сушка горячим воздухом в микроволновой печи	180 и 300 Вт	Процесс предварительной обработки с помощью ультразвука помог удалить внутреннюю влагу образца. Это помогло сохранить цвет образца. Однако по мере увеличения мощности ультразвука структура образца разрушалась, а цвет ухудшался	[45]
Оливки (*Olea Europea*)	Ультразвуковая водяная баня	25 кГц, 150 Вт	5 и 10	Сушка в микроволновой печи	180, 450 и 800 Вт	Микроволновая сушка с помощью ультразвука позволяет получить ломтики оливок с лучшим питательным составом, внешним видом и физическими свойствами за более короткое время сушки	[46]
Фасоль (*Phaseolus vulgaris* L.)	Ультразвуковая водяная баня	0, 100, 200 и 300 Вт	25	Сушка в микроволновой печи	–	Предварительная обработка ультразвуком улучшила эффективность сушки и физические свойства образцов, а также способствовала образованию пористых структур в высушенных бобах. Ультразвук способствовал гидролизу белка. Содержание свободных аминокислот увеличилось на 3,69–11,4 %	[28]
Плоды боярышника (*Crataegus aronia*)	Ультразвуковая водяная баня	37 кГц, 70 Вт	20	Сушка горячим воздухом в микроволновой печи	450 Вт	По сравнению с боярышником, высушенным горячим воздухом, горячим воздухом в микроволновой печи и методами инфракрасной сушки, сушка горячим воздухом в микроволновой печи с помощью ультразвука показывает более короткое время сушки, низкую скорость усадки, незначительное изменение цвета и улучшение питательного состава	[47]
Девясил вискозный (*Inula viscosa* L.)	Ультразвуковая водяная баня	37 кГц, 150 Вт	10, 20 и 30	Сушка в микроволновой печи	100, 180 и 300 Вт	Антиоксидантная активность образцов, высушенных методом СВЧ-сушки, проявляла наибольший уровень при времени ультразвуковой обработки 30 мин. Более высокая мощность микроволн увеличивает потерю содержания хлорофилла и каротиноидов	[48]
Киви (*Actinidia deliciosa*)	Ультразвуковая водяная баня	28 кГц, 70 Вт	10, 20 и 30	Сушка в микроволновой печи	100, 200 и 300 Вт	Влияние различной мощности микроволн и времени предварительной обработки ультразвуком на качество и тепловые свойства киви исследовали с использованием методологии поверхности отклика. С увеличением мощности микроволн и времени предварительной обработки ультразвуком время сушки и энергопотребление демонстрируют тенденцию к снижению	[49]

эффективности извлечения активных компонентов происходит за счет синергетического действия микроволнового и ультразвукового излучения, которое вызывает разрушение структуры клеточных тканей. Во время процесса комбинированной ультразвуковой-микроволновой экстракции микроволновая энергия поглощается материалами и сопровождается активным выделением тепла [55]. Это вызывает испарение влаги из внутренней части материала и давление на клеточную стенку, в результате чего клеточные стенки разрываются, и молекулы-мишени высвобождаются из клетки [56]. Схлопывание кавитационных пузырьков, образованных ультразвуковыми волнами, обеспечивает энергию для эффективного смешивания экстракционного растворителя и пищевых материалов. По сравнению с микроволновой и ультразвуковой экстракциями комбинированный метод ультразвуковой-микроволновой экстракции обладает такими преимуществами, как увеличение производительности и эффективности экстракции, а также улучшенными свойствами биологически активных соединений [57]. Сегодня комбинированной метод ультразвуковой-микроволновой экстракции применяется для извлечения широкого спектра ингредиентов из пищевого сырья и материалов, включая

1. Пищевое сырье из отходов агропродовольственного сектора. Например, для экстракции фенольных антиоксидантов из винных виноградных выжимок и отходов кожуры джекфрута, пектина из промышленных отходов томатов и флавоноидов из кожуры китайского водяного каштана [58–61];

2. Антиоксиданты из свежих фруктов и овощей, такие как экстракция ликопина из томатов и антоцианов из черноплодной рябины [62, 63];

3. Основные вещества из семян, орехов и зерен, такие как экстракция масла из семян чая и фенольных соединений из грецкого ореха [64];

4. Биологически активные соединения из других пищевых материалов, включая китайские лекарственные травы и растения-грибы, такие как экстракция полисахаридов из *Inonotus obliquus* и *Ganoderma lucidum* [65, 66].

Во время комбинированной ультразвуковой-микроволновой экстракции на сырье одновременно воздействуют микроволны и ультразвук. Мощность этих энергий можно регулировать в соответствии с температурой образца в реальном времени. Кроме того, для минимизации потерь растворителя можно установить блоки конденсации флегмы.

Влияние комбинированной ультразвуковой-микроволновой экстракции на извлечение и качество пищевых ингредиентов. Выход и эффективность экстракции являются ключевыми характеристиками метода экстракции. По сравнению с микроволновой и ультразвуковой экстракциями комбинированный метод ультразвуковой-микроволновой экстракции повышает выход экстракта нескольких ингредиентов, таких как антиоксидантные вещества, пектин и олигосахариды. H. Sun и др. экстрагировали противораковые полисахариды из плодов *Camptotheca acuminata* с использованием комбинированной ультразвуковой-микроволновой экстракции и других методов экстракции, включая микроволновую и ультразвуковую. Среди этих методов экстракции комбинированной процесс ультразвуковой-микроволновой экстракции привел к наивысшему выходу экстракта при использовании того же времени экстракции (20 мин) [67]. Аналогичная тенденция была отмечена в исследовании B. Hu и др., где пектин был извлечен из кожуры джекфрута с использованием методов УЗМЭ, микроволновой и ультразвуковой экстракции. Кроме того, результаты исследования эфирных масел, извлеченных из порошка перца, показали, что наибольшее количество эфирного масла было получено за более короткое время экстракции с использованием комбинированной ультразвуковой-микроволновой экстракции по сравнению с микроволновой и ультразвуковой экстракцией [64, 68].

Выход экстракции биоактивных ингредиентов с использованием комбинированной ультразвуковой-микроволновой экстракции может варьироваться. Это зависит от многих параметров, таких как мощность ультразвука и микроволнового излучения, соотношение жидкости и твердого вещества, время экстракции. Выход чувствительных биоактивных ингредиентов к экстракции увеличивается с повышением мощности микроволн и ультразвука. Однако эти соединения могут разлагаться при очень высокой мощности микроволнового и ультразвукового излучения [69]. Аналогичным образом оптимальное время экстракции может обеспечить максимальный выход экстракта, а дальнейшее увеличение диапазона времени процесса экстракции приводит к разрушению биологически активных соединений и снижению качества экстракта [70]. В исследованиях B. Liu и др., C. Liu с соавторами и X. Liu и др. масло грецкого ореха экстрагировали диметилкарбонатом, петролейным эфиром и растворителем для смешивания *н*-гексана с использованием комбинированной ультразвуковой-микроволновой экстракции при различных соотношениях жидкости и твердой фазы. Данные авторы сообщили об увеличении выхода экстракта при повышении соотношения твердой и жидкой фаз. Однако избыток растворителя привел к снижению выхода экстракта из-за ухудшения поглощения микроволновой энергии [71–73]. Чтобы оптимизировать параметры экстракции процесса комбинированной ультразвуковой-микроволновой экстракции для планирования экспериментов можно использовать метод поверхности отклика.

Биоактивные вещества, экстрагированные методом комбинированной ультразвуковой-микроволновой экстракции, были более высокого качества, чем ингредиенты, полученные с использованием микроволн или ультразвука. В исследовании A. A. Mahdi и др. 67 фенольных соединений были извлечены из цитрона комбинированным методом ультразвуковой-микро-

волновой экстракции [74]. Они проявили более высокую антиоксидантную активность, чем соединения, извлеченные с помощью микроволновой и ультразвуковой экстракции. Было проведено исследование влияния различных методов экстракции на антиоксидантную активность и состав эфирных масел, извлеченных из черного и белого перца. Результат показал, что эфирные масла, экстрагированные с помощью комбинированной ультразвуковой-микроволновой экстракции, обладают более высокой активностью по удалению супероксидных радикалов и более высоким содержанием монотерпена и сесквитерпена, чем эфирные масла, экстрагированные другими методами. С одной стороны, выход фенольных и флавоноидноидных соединений, извлекаемых с помощью комбинированной ультразвуковой-микроволновой экстракции, выше, чем при ультразвуковой и микроволновой экстракции. С другой стороны, более короткое время экстракции с использованием комбинированной ультразвуковой-микроволновой экстракции сокращает время воздействия микроволн на экстракт и препятствует структурному повреждению и деградации биоактивных веществ [70, 75].

Обработка жидких пищевых продуктов методом ультразвуковой и микроволновой стерилизации (УЗМСТ). Энергия микроволн использовалась для обезвреживания пищевых микроорганизмов и уничтожения спор. Из-за короткого времени стерилизации этот процесс практически не влияет на качество продуктов и их пищевую ценность. Микроволны и ультразвук используются для стерилизации. Во время обработки ультразвуковые волны вызывали быстрое образование и разрушение пузырьков в продукте. Этот кавитационный эффект способствует высвобождению ударных волн с высокими температурами и давлением в локальной области в течение короткого периода времени (< 100 нс) для инактивации микроорганизмов.

Комбинированный метод ультразвуковой-микроволновой стерилизации был разработан для объединения преимуществ методов микроволновой и ультразвуковой стерилизации [76]. Технология комбинированной ультразвуковой-микроволновой стерилизации может улучшить неравномерный нагрев технологии микроволновой стерилизации и повысить температуру и эффективность ультразвуковой стерилизации [71]. В процессе комбинированной ультразвуковой-микроволновой стерилизации пищевые продукты обрабатываются одновременно ультразвуковой и микроволновой энергией для инактивации микроорганизмов. Сегодня эта технология успешно применяется для стерилизации соковой продукции. По сравнению с традиционными технологиями стерилизации (микроволновая и ультразвуковая) комбинированная ультразвуковая-микроволновая стерилизация характеризуется продолжительностью стерилизации и незначительным влиянием на качество сока.

B. H. Samani и др. подвергли обработке вишневый сок с использованием методов УЗМСТ, микроволновой и ультразвуковой стерилизации. Результат показал, что пастеризованный комбинированным методом ультразвуковой-микроволновой стерилизации сок имел низкое количество *Escherichia coli* и *Saccharomyces cerevisiae* и высокое содержание витаминов, общих фенолов и соединений антоцианов [77]. M. J. Das и др. установили, что комбинированный метод ультразвуковой-микроволновой стерилизации улучшил инактивацию *Listeria monocytogenes* в соке тыквы в бутылках по сравнению с обычными методами стерилизации. Ученые обнаружили, что время ультразвука и микроволновая температура положительно коррелируют с эффективностью инактивации [78]. Последовательное воздействие ультразвуковых волн и микроволн положительно влияет на стерилизацию жидкостей. O. N. Kernou и др. предварительно обрабатывали апельсиновый сок ультразвуковыми волнами в течение разного времени (от 5 до 60 мин) перед микроволновой стерилизацией при мощности микроволн 300, 600 и 900 Вт в разное время в течение 5 и 35 с. Ученые заметили, что этот способ улучшил эффективность инактивации *E. coli* ATCC 25922 по сравнению с микроволновой стерилизацией [16]. Ультразвуковая обработка сока ежевики проводилась после бланширования в микроволновой печи в исследовании B. Pérez-Grijalva и др. Установлено снижение уровня микроорганизмов и сохранение большего количества антиоксидантов, таких как антоцианы и фенольные соединения [79].

Ограничения и перспективы использования ультразвуковой и микроволновой технологии обработки пищевых продуктов. Необходимо отметить работы российских ученых И. А. Шортского в соавторстве с другими исследователями о влиянии импульсного электрического поля и импульсной микроволновой обработки на морфологические и структурные характеристики семян подсолнечника, об экстракции семян подсолнечника с помощью импульсных электрических полей, о применении обработки импульсным электрическим полем для повышения выхода продукта и эффективности биоактивных соединений за счет экстракции из кожуры при переработке киви и другие исследования, которые посвящены использованию импульсного электрического поля в качестве предварительной обработки перед сушкой или проведением процесса экстракции [80–85]. Научных публикаций российских авторов по использованию комбинированных микроволново-ультразвуковых технологий для обработки пищевых продуктов на момент написания данного обзора не установлено. Ученые сообщают о разработке нового оборудования, которое сочетает ультразвуковую и микроволновую обработку для размораживания, сушки, жарки, экстракции и обработки жидкостей. Некоторые разработанные устройства представляли собой обычную комбинацию двух отдельных единиц оборудования. Сочетание нескольких физических полей требует более высоких технологий и затрат, а срок службы интегрированного оборудования

пока не может быть гарантирован. Необходимы дальнейшие исследования для того, чтобы понять синергетический эффект ультразвуковых и микроволновых методов и оптимизировать характеристики комбинированных ультразвуковых и микроволновых устройств с точки зрения объема, технологии, показателей безопасности и интеллектуального регулирования.

Как видно из результатов исследования, ультразвуковое-микроволновое оборудование позволяет одновременно регулировать микроволновые и ультразвуковые параметры с помощью системы управления, а также контролировать процесс обработки в режиме реального времени с помощью машинного зрения или других технологий. Однако эффективность разработанного оборудования оценивалась только в лабораторных масштабах, что затрудняет его промышленное внедрение. Производство пищевых продуктов в промышленных масштабах требует обработки пищевых материалов при относительно высокой мощности и частоте микроволнового и ультразвукового излучения, что увеличивает сложность конструкции оборудования и материальные затраты. Хотя сочетание ультразвуковой и микроволновой обработки пищевых продуктов улучшило некоторые ключевые характеристики качества, существуют проблемы и ограничения по их широкому промышленному внедрению:

1. Несмотря на то что многие исследования подтверждают положительное влияние на качество продуктов в процессе ультразвукового и микроволнового размораживания, этот метод пока не нашел широкого промышленного использования из-за сложности процесса. Конструкция оборудования нуждается в дальнейшей оптимизации для обеспечения возможности управления в режиме реального времени параметрами ультразвуковой и микроволновой обработки во время процесса. Пищевые продукты помещаются в ванну с водой при комбинированном ультразвуково-микроволновом оттаивании. Эта вода поглощает ультразвуковую и микроволновую энергию, что снижает эффективность использования энергии;

2. Хотя предварительная обработка ультразвуком сокращает время сушки пищевых продуктов во время последующей сушки в микроволновой печи, общее время обработки и сушки имеет тенденцию к увеличению. Например, M. Li и др. заметили, что предварительная ультразвуковая обработка сокращает время сушки фасоли в микроволновой печи на 16,67–27,97 % по сравнению с материалами такой предварительной обработки. Однако общее время обработки увеличилось на 16,09–44,06 % [28]. В исследовании D. Su и др. сушка *Pleurotus eryngii*с с помощью комбинированной ультразвуковой-микроволновой сушки и микроволновой сушки горячим воздухом была завершена за 90 и 80 мин соответственно, хотя процесс микроволновой предварительной обработки с помощью ультразвуковой сушки потреблял меньше энергии [32];

3. Благодаря высокой эффективности сушки и равномерному высыханию пищевых материалов высушенные комбинированным методом ультразвуковой-микроволновой сушки пищевые продукты лучше сохраняют питательные вещества и цвет, чем продукты, высушенные с помощью микроволновой сушки и предварительной ультразвуковой сушки с помощью микроволновой сушки. Высокое энергопотребление комбинированного процесса ультразвуковой-микроволновой сушки является проблемой для широкого промышленного применения;

4. Комбинированная ультразвуковая-микроволновая экстракция – это перспективный метод экстракции с большим потенциалом применения в пищевой промышленности. Использование данного метода экстракции повышает выход экстракта и эффективность пищевых ингредиентов за счет комбинированного вибрационно-кавитационного и теплового воздействия ультразвуковой обработки и микроволнового излучения соответственно. Однако необходимы дальнейшие исследования для изучения влияния ультразвуковой и микроволновой энергии на структуру ткани материала и высвобождение целевого соединения во время процесса ультразвуковой-микроволновой экстракции. Как и методы комбинированной сушки и размораживания, исследования метода ультразвуковой-микроволновой экстракции проводилось в лабораторных масштабах. Для его промышленного применения необходимы дальнейшие пилотные или промышленные исследования.

Выводы

Комбинирование ультразвукового и микроволнового метода способно устранить проблемы и недостатки, которые возникают при использовании данных методов в отдельности. Недостатком ультразвука, применяемого для обработки пищевых продуктов, является низкий тепловой эффект, который приводит к длительному времени обработки. Когда микроволны применяются для обработки пищевых продуктов, то их объемный нагрев повышает эффективность обработки, но избирательный нагрев негативно влияет на качество обработанных пищевых продуктов. Комбинированное воздействие ультразвука и микроволн способно повысить эффективность процесса обработки пищевых продуктов, сохраняя их пищевую ценность. Эффективность процесса оттаивания и качество размороженных быстрозамороженных продуктов могут быть улучшены при комбинированном воздействии ультразвука и микроволн. Синергетический эффект ультразвука и микроволн вызывает изменение структуры тканей пищевых материалов, что способствует снижению сопротивления, возникающего в процессе сушки, и повышает эффективность процесса сушки. Применение комбинированного воздействия ультразвука и микроволн в процессе экстракции способствовало эффективному извлечению активных компонентов из пищевых материалов. Этот процесс также использовался для эффективной обработки жидких пищевых продуктов. Комбинированный метод ультразвуковой и микроволновой

экстракции может быть использован для увеличения выхода, повышения эффективности экстракции и улучшения физико-химических свойств активных соединений. Этот процесс эффективнее, чем традиционные методы термической экстракции или настаивания. Ультразвук играет важную роль в процессе микроволнового нагрева фруктовых и овощных соков. Он помогает в процессах гомогенизации и совместной стерилизации. Совместное использование микроволнового и ультразвукового оборудования для размораживания, сушки, экстракции и стерилизации пищевых продуктов стали чаще использовать в научных исследованиях.

Результаты обзора могут быть использованы при проведении дальнейших исследований по оптимизации процессов экстракции, сушки, размораживания и стерилизации, а также специалистами пищевой промышленности при выборе оптимальных способов обработки сырья и пищевых продуктов.

Критерии авторства

Л. Ч. Бурак – концептуализация, разработка методологии исследования, научное руководство исследованием, проведение исследования, анализ и интерпретация данных, написание и редактирование рукописи. А. П. Завалей – проведение исследования, валидация данных, подготовка и написание черновика рукописи, курирование данных, работа с программным обеспечением, редактирование рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Contribution

L.Ch. Burak – conceptualization, development of research methodology, scientific supervision of the study, conduct of the study, analysis and interpretation of data, writing and editing the manuscript. A.P. Zavaley – conducting the study, data validation, preparing and writing a draft manuscript, data curation, working with software, editing the manuscript

Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interest.

References/Список литературы

1. Mao Y, Wang S. Recent developments in radio frequency drying for food and agricultural products using a multi-stage strategy: A review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2021;63(16):2654–2671. https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1978925

2. Szadzinska J, Lechtanska J, Kowalski SJ, Stasiak M. The effect of high power airborne ultrasound and microwaves on convective drying effectiveness and quality of green pepper. Ultrasonics Sonochemistry. 2017;34:531–539. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.030

3. Dave J, Kumar N, Upadhyay A, Purba DT, Kudre T, Nukthamna P, Sa-nguanpuag S, *et al.* Sustainable fish oil extraction from catfish visceral biomass: A comparative study between high-shear homogenization and highfrequency ultrasound on wet rendering process. Foods and Raw Materials. 2025;13(1):94–106. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2025-1-627

4. Munoz-Almagro N, Morales-Soriano E, Villamiel M, Condezo-Hoyos L. Hybrid high-intensity ultrasound and microwave treatment: A review on its effect on quality and bioactivity of foods. Ultrasonics Sonochemistry. 2021;80:105835. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105835

5. Bhargava N, Mor RS, Kumar K, Sharanagat VS. Advances in application of ultrasound in food processing: A review. Ultrasonics Sonochemistry. 2021;70:105293 https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105293

6. Kahraman O, Malvandi A, Vargas L, Feng H. Drying characteristics and quality attributes of apple slices dried by a non-thermal ultrasonic contact drying method. Ultrasonics Sonochemistry. 2021;73:105510. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105510

7. Li M, Zhou C, Wang B, Zeng S, Mu R, Li G, *et al.* Research progress and application of ultrasonic- and microwave-assisted food processing technology. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2023;22(5):3707–3731. https://doi.org/10.1111/1541-4337.13198

8. Guzik P, Kulawik P, Zając M, Migdał W. Microwave applications in the food industry: An overview of recent developments. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2021;62(29):7989–8008. https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1922871

9. Klinbun W, Rattanadecho P. Effects of power input and food aspect ratio on microwave thawing process of frozen food in commercial oven. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy. 2019;53(4):225–242. https://doi.org/10.1080/08327823.2019.1677430

10. Kumar C, Kari MA. Microwave-convective drying of food materials: A critical review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2019;59(3):379–394. https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1373269

11. Zielinska M, Ropelewska E, Xiao H-W, Mujumdar AS, Law CL. Review of recent applications and research progress in hybrid and combined microwave-assisted drying of food products: Quality properties. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2020;60(13):2212–2264. https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1632788

12. Valinger D, Kušen M, Benković M, Jurina T, Panić M, Radojčić Redovniković I, *et al.* Enhancement of the green extraction of bioactive molecules from *Olea europaea* leaves. Separations. 2022;9(2):33. https://doi.org/10.3390/separations9020033

13. Xu J, Wang D, Lei Y, Cheng L, Zhuang W, Tian Y. Effects of combined ultrasonic and microwave vacuum drying on drying characteristics and physicochemical properties of *Tremella fuciformis*. Ultrasonics Sonochemistry. 2022;84:105963. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.105963

14. Lv W, Li D, Lv H, Jin X, Han Q, Su D, *et al.* Recent development of microwave fluidization technology for drying of fresh fruits and vegetables. Trends in Food Science and Technology. 2019;86:59–67. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.047

15. Cai L, Zhang W, Cao A, Cao M. Effects of different thawing methods on the quality of largemouth bass (*Micropterus salmoides*). LWT. 2020;120:108908. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108908

16. Kernou ON, Belbahi A, Amir A, Bedjaoui K, Kerdouche K, Dairi S, *et al.* Effect of sonication on microwave inactivation of *Escherichia coli* in an orange juice beverage. Journal of Food Process Engineering. 2021;44(5):e13664. https://doi.org/10.1111/jfpe.13664

17. Qiu L, Zhang M, Chitrakar B, Bhandari B. Application of power ultrasound in freezing and thawing Processes: Effect on process efficiency and product quality. Ultrasonics Sonochemistry. 2020;68:105230. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105230

18. Zhu MM, Wang YQ, Liu XJ, Yao DH, Kang ZL, Zhao SM, *et al.* Effects of rapid and slow thawing methods on quality characteristics and protein denaturation of frozen pork. Science and Technology of Food Industry. 2018;39(23):23–30. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.23.005

19. Icier F, Cokgezme OF, Sabanci S. Alternative thawing methods for the blanched/non-blanched potato cubes: Microwave, ohmic, and carbon fiber plate assisted cabin thawing. Journal of Food Process Engineering. 2017;40(2):e12403. https://doi.org/10.1111/jfpe.12403

20. Zhang R, Wang Y, Wang X, Luan D. Study of heating characteristics for a continuous 915 MHz pilot scale microwave thawing system. Food Control. 2019;104:105–114. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.04.030

21. Sun Q, Kong B, Liu S, Zheng O, Zhang C. Ultrasound-assisted thawing accelerates the thawing of common carp (*Cyprinus carpio*) and improves its muscle quality. LWT. 2021;141:111080. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111080

22. Wang Y-Y, Yan J-K, Ding Y, Ma H. Effects of ultrasound on the thawing of quick-frozen small yellow croaker (*Larimichthys polyactis*) based on TMT-labeled quantitative proteomic. Food Chemistry. 2021;366:130600. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130600

23. Li X, Ma Y, Sun P, Liu H, Cai L, Li J. Effect of ultrasonic thawing on protein properties and muscle quality of Bonito. Journal of Food Processing and Preservation. 2020;45(1):e14930. https://doi.org/10.1111/jfpp.14930

24. Cai L, Zhang W, Cao A, Cao M, Li J. Effects of ultrasonics combined with far infrared or microwave thawing on protein denaturation and moisture migration of *Sciaenops ocellatus* (red drum). Ultrasonics Sonochemistry. 2019;55:96–104. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.03.017

25. Cai L, Wan J, Li X, Li J. Effects of different thawing methods on conformation and oxidation of myofibrillar protein from largemouth bass (*Micropterus salmoides*). Journal of Food Science. 2020;85(8):2470–2480. https://doi.org/10.1111/1750-3841.15336

26. Zhu M-M, Peng Z-Y, Lu S, He H-J, Kang Z-L, Ma H-J, *et al.* Physicochemical properties and protein denaturation of pork longissimus dorsi muscle subjected to six microwave-based thawing methods. Foods. 2019;9(1):26. https://doi.org/10.3390/foods9010026

27. Cao X, Zhang M, Mujumdar AS, Zhong Q. Evaluation of quality properties and water mobility in vacuum microwave-dried carrot slices using pulse-spouted bed with hot air. Drying Technology. 2018;37(9):1087–1096. https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1484758

28. Li M, Wang B, Lv W, Zhao D. Effect of ultrasound pretreatment on the drying kinetics and characteristics of pregelatinized kidney beans based on microwave-assisted drying. Food Chemistry. 2022;397:133806. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133806

29. Kipcak AS, Ismail O. Microwave drying of fish, chicken and beef samples. Journal of Food Science Technology. 2021;58(1):281–291. https://doi.org/10.1007/s13197-020-04540-0

30. Zhang J, Li M, Ding Z, Wang C, Cheng J. Evaluation of ultrasound-assisted microwave hot air convective drying Chinese hickory – Drying kinetics and product's quality properties. Journal of Food Process Engineering. 2021;44(11):e13842. https://doi.org/10.1111/jfpe.13842

31. Liu Y, Wang Y, Lv W, Li D, Wang L. Freeze-thaw and ultrasound pretreatment before microwave combined drying affects drying kinetics, cell structure and quality parameters of *Platycodon grandiflorum*. Industrial Crops and Products. 2021;164:113391. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113391

32. Su D, Sun W, Li B, Yang Y, Wang Y, Lv W, *et al.* Influence of ultrasonic pretreatments on microwave hot-air flow rolling drying mechanism, thermal characteristics and rehydration dynamics of *Pleurotus eryngii*. Journal of the Science of Food and Agriculture. 2022;102(5):2100–2109. https://doi.org/10.1002/jsfa.11551

33. Feng L, Xu Y, Xiao Y, Song J, Li D, Zhang Z, *et al.* Effects of pre-drying treatments combined with explosion puffing drying on the physicochemical properties, antioxidant activities and flavor characteristics of apples. Food Chemistry. 2021;338:128015. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128015

34. Zhao Y, Zhu H, Xu J, Zhuang W, Zheng B, Lo YM, *et al.* Microwave vacuum drying of lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) seeds: Effects of ultrasonic pretreatment on color, antioxidant activity, and rehydration capacity. LWT. 2021;149:111603. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111603

35. Horuz E, Jaafar HJ, Maskan M. Ultrasonication as pretreatment for drying of tomato slices in a hot air-microwave hybrid oven. Drying Technology. 2016;35(7):849–859. https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1222538

36. Zhang L, Liao L, Qiao Y, Wang C, Shi D, An K, *et al.* Effects of ultrahigh pressure and ultrasound pretreatments on properties of strawberry chips prepared by vacuum-freeze drying. Food Chemistry. 2020;303:125386. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125386

37. Li L, Zhang M, Wang W. Ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment before pulsed fluidized bed microwave freeze-drying (PFBMFD) of Chinese yam. Food Bioscience. 2020;35:100548. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100548

38. Zhao Y, Zheng Y, Li Z, Jiang Y, Zhuang W, Zheng B, *et al.* Effects of ultrasonic pretreatments on thermodynamic properties, water state, color kinetics, and free amino acid composition in microwave vacuum dried lotus seeds. Drying Technology. 2019;38(4):534–544. https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1587618

39. Dehghannya J, Kadkhodaei S, Heshmati MK, Ghanbarzadeh B. Ultrasound-assisted intensification of a hybrid intermittent microwave – Hot air drying process of potato: Quality aspects and energy consumption. Ultrasonics. 2019;96:104–122. https://doi.org/10.1016/j.ultras.2019.02.005

40. Wiktor A, Witrowa-Rajchert D. Drying kinetics and quality of carrots subjected to microwave-assisted drying preceded by combined pulsed electric field and ultrasound treatment. Drying Technology. 2019;38(1–2):176–188. https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1642347

41. Lagnika C, Huang J, Jiang N, Li D, Liu C, Song J, *et al.* Ultrasound-assisted osmotic process on quality of microwave vacuum drying sweet potato. Drying Technology. 2018;36(11):1367–1379. https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1402786

42. Nowacka M, Wiktor A, Anuszewska A, Dadan M, Rybak K, Witrowa-Rajchert D. The application of unconventional technologies as pulsed electric field, ultrasound and microwave-vacuum drying in the production of dried cranberry snacks. Ultrasonics Sonochemistry. 2019;56:1–13. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.03.023

43. Jiang J, Zhang M, Devahastin S, Yu D. Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatments on drying and quality characteristics of pulsed fluidized bed microwave freeze-dried strawberries. LWT. 2021;145:111300. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111300

44. Sledz M, Wiktor A, Rybak M, Nowacka M, Witrowa-Rajchert D. The impact of ultrasound and steam blanching pre-treatments on the drying kinetics, energy consumption and selected properties of parsley leaves. Applied Acoustics. 2016;103:148–156. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.05.006

45. Shamaei S, Emam-Djomeh Z, Moini S. Ultrasound-assisted osmotic dehydration of cranberries: Effect of finish drying methods and ultrasonic frequency on textural properties. Journal of Texture Studies. 2012;43(2):133–141. https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.2011.00323.x

46. Aydar AY. Investigation of ultrasound pretreatment time and microwave power level on drying and rehydration kinetics of green olives. Food Science and Technology. 2021;41(1):238–244. https://doi.org/10.1590/fst.15720

47. Abbaspour-Gilandeh Y, Kaveh M, Fatemi H, Aziz M. Combined hot air, microwave, and infrared drying of hawthorn fruit: Effects of ultrasonic pretreatment on drying time, energy, qualitative, and bioactive compounds' properties. Foods. 2021;10(5):1006. https://doi.org/10.3390/foods10051006

48. Aydar AY, Aydin T, Yilmaz T, Kothakota A, Socol CT, Criste FC, *et al.* Investigation on the influence of ultrasonic pretreatment on color, quality and antioxidant attributes of microwave dried Inula *viscosa* (L.). Ultrasonics Sonochemistry. 2022;90:106184. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106184

49. Kaveh M, Taghinezhad E, Witrowa-Rajchert D, Imanian K, Khalife E, Nowacka M. Use of ultrasound pre-treatment before microwave drying of kiwifruits – An optimization approach with response surface methodology. Journal of Food Processing and Preservation. 2022;46(7):e16714. https://doi.org/10.1111/jfpp.16714

50. Lv W, Lv H, Jin X, Cui Z, Su D. Effects of ultrasound-assisted methods on the drying processes and quality of apple slices in microwave drying. Drying Technology. 2020;38(13):1806–1816. https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1666274

51. Bhat ZF, Morton JD, Kumar S, Bhat HF, Aadil RM, Bekhit AE-DA. Ultrasonication as an emerging technology for processing of animal derived foods: A focus on *in vitro* protein digestibility. Trends in Food Science and Technology. 2022;124:309–322. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.04.012

52. Şen S, Aydin F. Experimental investigation of drying kinetics of apple with hot air, microwave and ultrasonic power. Sādhanā. 2020;45:94. https://doi.org/10.1007/s12046-020-01326-0

53. Wang W, Lei Y, Lo YM, Han Y, Zheng B, Tian Y. Process effectiveness assessment by modeling the kinetics of lotus seed drying combining air-borne ultrasound and microwave vacuum. Journal of Food Process Engineering. 2021;44(9):e13795. https://doi.org/10.1111/jfpe.13795

54. Kowalski SJ, Pawłowski A, Szadzińska J, Łechtańska J, Stasiak M. High power airborne ultrasound assist in combined drying of raspberries. Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2016;34:225–233. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.02.006

55. Shahram H, Dinani ST. Optimization of ultrasonic-assisted enzymatic extraction of β-carotene from orange processing waste. Journal of Food Process Engineering. 2019;42(4):e13042. https://doi.org/10.1111/jfpe.13042

56. Bagade SB, Patil M. Recent advances in microwave assisted extraction of bioactive compounds from complex herbal samples: A review. Critical Reviews in Analytical Chemistry. 2021;51(2):138–149. https://doi.org/10.1080/10408347.2019.1686966

57. Vinatoru M, Mason TJ, Calinescu I. Ultrasonically assisted extraction (UAE) and microwave assisted extraction (MAE) of functional compounds from plant materials. TrAC Trends in Analytical Chemistry. 2017;97:159–178. https://doi.org/10.1016/j.trac.2017.09.002

58. Wang J, Zhang Y, Wang H, Huo S. Evaluation of extraction technologies and optimization of microwave and ultrasonic assisted consecutive extraction of phenolic antioxidants from winery byproducts. Journal of Food Process Engineering. 2019;42(4):e13064. https://doi.org/10.1111/jfpe.13064

59. Jiang Z, Shi R, Chen H, Wang Y. Ultrasonic microwave-assisted extraction coupled with macroporous resin chromatography for the purification of antioxidant phenolics from waste jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) peels. Journal of Food Science and Technology. 2019;56:3877–3886. https://doi.org/10.1007/s13197-019-03858-8

60. Lasunon P, Sengkhamparn N. Effect of ultrasound-assisted, microwave-assisted and ultrasound-microwave-assisted extraction on pectin extraction from industrial tomato waste. Molecules. 2022;27(4):1157. https://doi.org/10.3390/molecules27041157

61. Xu L, He W, Lu M, Yuan B, Zeng M, Tao G, *et al.* Enzyme-assisted ultrasonic-microwave synergistic extraction and UPLC-QTOF-MS analysis of flavonoids from Chinese water chestnut peels. Industrial Crops and Products. 2022;117:179–186. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.03.012

62. Lianfu Z, Zelong L. Optimization and comparison of ultrasound/microwave assisted extraction (UMAE) and ultrasonic assisted extraction (UAE) of lycopene from tomatoes. Ultrasonics Sonochemistry. 2008;15(5):731–737. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2007.12.001

63. Lin S, Meng X, Tan C, Tong Y, Wan M, Wang M, *et al.* Composition and antioxidant activity of anthocyanins from *Aronia melanocarpa* extracted using an ultrasonic-microwave-assisted natural deep eutectic solvent extraction method. Ultrasonics Sonochemistry. 2022;89:106102. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106102

64. Hu B, Li C, Qin W, Zhang Z, Liu Y, Zhang Q, *et al.* A method for extracting oil from tea (*Camellia sinensis*) seed by microwave in combination with ultrasonic and evaluation of its quality. Industrial Crops and Products. 2019;131:234–242. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.01.068

65. Huang S, Ning Z. Extraction of polysaccharide from *Ganoderma lucidum* and its immune enhancement activity. International Journal of Biological Macromolecules. 2010;47(3):336–341. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2010.03.019

66. Chen Y, Gu X, Huang S, Li J, Wang X, Tang J. Optimization of ultrasonic/microwave assisted extraction (UMAE) of polysaccharides from *Inonotus obliquus* and evaluation of its anti-tumor activities. International Journal Biological Macromolecules. 2010;46(4):429–435. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2010.02.003

67. Sun H, Li C, Ni Y, Yao L, Jiang H, Ren X, *et al.* Ultrasonic/microwave-assisted extraction of polysaccharides from *Camptotheca acuminata* fruits and its antitumor activity. Carbohydrate Polymers. 2019;206:557–564. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.11.010

68. Wang Y, Li R, Jiang Z-T, Tan J, Tang S-H, Li T-T, *et al.* Green and solvent-free simultaneous ultrasonic-microwave assisted extraction of essential oil from white and black peppers. Industrial Crops and Products. 2018;114:164–172. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.02.002

69. Chen Q, Dong W, Wei C, Hu R, Long Y. Combining integrated ultrasonic-microwave technique with ethanol to maximise extraction of green coffee oil from Arabica coffee beans. Industrial Crops and Products. 2020;151:112405. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112405

70. Shen S, Zhou C, Zeng Y, Zhang H, Hossen MA, Dai J, *et al.* Structures, physicochemical and bioactive properties of polysaccharides extracted from *Panax notoginseng* using ultrasonic/microwave-assisted extraction. LWT. 2022;154:112446. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112446

71. Liu B, Jin F, Li Y, Wang H, Chi Y, Tian B, *et al.* Pasteurization of egg white by integrating ultrasound and microwave: Effect on structure and functional properties. Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2022;79:103063. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103063

72. Liu C, Ni H-Y, Chang Y-H, Wang Z-L, Wan N, Cao L, *et al.* Effects of ultrasonic-microwave assisted extraction with green solvent on the chemical constituents, antioxidant, and hypolipidemic activities of Manchurian walnut oil. Journal of Food Processing and Preservation. 2022;46(7):e16603. https://doi.org/10.1111/jfpp.16603

73. Liu X, Xue Y, Xie H, Li J, Wang J, Ding T, *et al.* Effects of soaking temperature and ultrasonic power on the cooking time and physical properties of brown rice. Journal of Food Processing and Preservation. 2022;46(10):e16909. https://doi.org/10.1111/jfpp.16909

74. Mahdi AA, Rashed MMA, Al-Ansi W, Ahmed MI, Obadi M, Jiang Q, *et al.* Enhancing bio-recovery of bioactive compounds extracted from *Citrus medica* L. Var. *sarcodactylis*: Optimization performance of integrated of pulsed-ultrasonic/microwave technique. Journal of Food Measurement and Characterization. 2019;13:1661–1673. https://doi.org/10.1007/s11694-019-00083-x

75. Wang X, Reddy CK, Xu B. A systematic comparative study on morphological, crystallinity, pasting, thermal and functional characteristics of starches resources utilized in China. Food Chemistry. 2018;259:81–88. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.03.121

76. Cheng C, Jia M, Gui Y, Ma Y. Comparison of the effects of novel processing technologies and conventional thermal pasteurisation on the nutritional quality and aroma of Mandarin (*Citrus unshiu*) juice. Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2020;64:102425. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102425

77. Samani BH, Khoshtaghaza MH, Minaei S, Zareifourosh H, Eshtiaghi MN, Rostami S. Design, development and evaluation of an automatic fruit-juice pasteurization system using microwave-ultrasonic waves. Journal of Food Science and Technology. 2016;53:88–103. https://doi.org/10.1007/s13197-015-2026-6

78. Das MJ, Das AJ, Chakraborty S, Baishya P, Ramteke A, Deka SC. Effects of microwave combined with ultrasound treatment on the pasteurization and nutritional properties of bottle gourd (*Lagenaria siceraria*) juice. Journal of Food Processing and Preservation. 2020;44(12):e14904. https://doi.org/10.1111/jfpp.14904

79. Pérez-Grijalva B, Herrera-Sotero M, Mora-Escobedo R, Zebadúa-García JC, Silva-Hernández E, Oliart-Ros R, *et al.* Effect of microwaves and ultrasound on bioactive compounds and microbiological quality of blackberry juice. LWT. 2018;87:47–53. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.08.059

80. Shorstkii IA, Zherlicin AG, Li P. Impact of pulsed electric field and pulsed microwave treatment on morphological and structural characteristics of sunflower seed. OCL. 2019;26(7):47. https://doi.org/10.1051/ocl/2019048

81. Shorstkii I, Koshevoi E. Extraction kinetic of sunflower seeds assisted by pulsed electric fields. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science. 2019;43:813–817. https://doi.org/10.1007/s40995-018-0591-z

82. Shorstkii I, Stuehmeier-Niehe C, Sosnin M, Ali Mounassar EH, Comiotto-Alles M, Siemer C, *et al.* Pulsed electric field treatment application to improve product yield and efficiency of bioactive compounds through extraction from peels in kiwifruit processing. Journal of Food Processing and Preservation. 2023;2023(1):8172255. https://doi.org/10.1155/2023/8172255

83. Lammerskitten A, Shorstkii I, Parniakov O, Mykhailyk V, Toepfl S, Rybak K, *et al.* The effect of different methods of mango drying assisted by a pulsed electric field on chemical and physical properties. Journal of Food Processing and Preservation. 2020;44(12):e14973. https://doi.org/10.1111/jfpp.14973

84. Shorstkii I, Sosnin M, Smetana S, Toepfl S, Parniakov O, Wiktor A. Correlation of the cell disintegration index with Luikov's heat and mass transfer parameters for drying of pulsed electric field (PEF) pretreated plant materials. Journal of Food Engineering. 2022;316:110822. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110822

85. Shorstkii I, Alles MC, Parniakov O, Smetana S, Aganovic K, Sosnin M, *et al.* Optimization of pulsed electric field assisted drying process of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae. Drying Technology. 2020;40(3):595–603. https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1819825