

<https://doi.org/10.36107/hfb.2024.i1.s204>

УДК 664.6

# Улучшение технологических свойств продовольственного зерна за счет использования современных технологий: Обзор предметного поля

Л. Ч. Бурак, А. Н. Сапач

ООО «БЕЛПРОСАКВА»,  
Республика Беларусь

**Корреспонденция:**

Бурак Леонид Чеславович,  
ООО «Белпросаква»,  
220015, Республика Беларусь, г. Минск,  
ул. Пономаренко, 35а  
E-mail: leonidburak@gmail.com

**Конфликт интересов:**

авторы сообщают об отсутствии  
конфликта интересов.

**Поступила:** 23.02.2024**Поступила после  
рецензирования:** 01.04.2024**Принята:** 27.04.2024**Copyright:** © 2024 Авторы**АННОТАЦИЯ**

**Введение.** Снижение времени обработки и отрицательного влияния на качество продукта позволяет рассматривать современные способы термической и нетермической обработки в качестве эффективной альтернативы традиционным термическим методам.

**Цель** статьи провести критический анализ, систематизацию и обобщение результатов научных исследований принципов и преимуществ технологий термической и нетермической обработки и их влиянию на технологические свойства продовольственного зерна.

**Материалы и методы.** В обзор включены зарубежные статьи опубликованные на английском языке за период 2015–2024 год. Поиск зарубежной научной литературы на английском языке по данной теме проводили в библиографических базах Scopus, Web of Science, Elsevier и Google Scholar. Материалами для исследования послужили 143 статьи.

**Результаты.** Современные нетермические и термические методы являются экологичной и эффективной альтернативой традиционной химической и термической обработке продовольственного зерна. Обзор результатов научных исследований показал, что использование новых технологий в большинстве случаев положительно коррелирует с качеством продовольственного зерна. Обработка ультразвуком приводит к разрыву внутренних водородных связей между молекулами белка, тем самым ослабляя их третичную и четвертичную структуры усиливает гидролиз крахмала и снижает его вязкость. Обработка импульсным электрическим полем может вызывать конфигурационные и молекулярные изменения в биомакромолекулах сырья. В результате радиочастотного нагрева происходит увеличение набухания гранул, что приводит к незначительной желатинизации и ретроградации крахмала, одновременно снижая стабильность крахмального теста. Микроволновой нагрев приводит к образованию плотных и более однородных пор и структур внутри образца, тем самым способствуя образованию сетки гидратного геля крахмала. Вместе с тем различие в конструкции оборудования, режимах, условиях эксплуатации не позволяет в полной мере провести оценку влияния этих методов на консистенцию пищевого зерна.

**Выводы.** Необходимы углубленные исследования влияния современных технологий на текстурные свойства зерновых и бобовых культур, обеспечив при этом подбор и разработку параметров обработки для каждого вида продовольственного зерна. Результаты данного обзора могут представлять интерес для дальнейших научных исследований, а также для специалистов пищевой промышленности с целью внедрения этих передовых технологий.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА**

продовольственное зерно, сушка, предварительная обработка, технологические свойства, ультразвук, холодная плазма, импульсное электрическое поле, микроволновой нагрев, радиочастотный нагрев, инфракрасный нагрев



**Для цитирования:** Бурак, Л. Ч., & Сапач, А. Н. (2024). Улучшение технологических свойств продовольственного зерна за счет использования современных технологий: Обзор предметного поля. *Health, Food & Biotechnology*, 6(1), 40–64. <https://doi.org/10.36107/hfb.2024.i1.s204>

<https://doi.org/10.36107/hfb.2024.i1.s204>

# Improving Technological Properties of Food Grain Through the Use of Modern Technologies: Scoping Review

Leonid Ch. Burak, Aleksandr N. Sapach

LLC "BELROSAKVA", Republic of Belarus

## Correspondence:

**Leonid Ch. Burak**,  
Belrosakva LLC,  
220015, Republic of Belarus, Minsk,  
st. Ponomarenko, 35a  
E-mail: leonidburak@gmail.com

**Declaration of competing interest:**  
none declared.

**Received:** 23.02.2024

**Received in revised form:** 01.04.2024

**Accepted:** 27.04.2024

**Copyright:** © 2024 The Authors

## ABSTRACT

**Introduction.** Over the past decades, the interest of the scientific community in modern technologies of thermal and non-thermal processing has grown significantly. Reducing processing time and the negative impact on product quality allows us to consider these technologies as an effective alternative to traditional thermal methods. Technological properties of grain products includes many important characteristics that.

**Purpose.** The purpose of the article is to conduct a critical analysis, systematization and generalization of the results of scientific research on the fundamental principles and advantages of thermal and non-thermal processing technologies and their impact on the textural properties of food grains.

**Materials and Methods.** The review includes foreign articles published in English for the period 2015-2024. The search for foreign scientific literature in English on this topic was carried out in the bibliographic databases Scopus, Web of Science, Elsevier and Google Scholar. The materials for the study included 143 articles. When selecting publications for review, priority was given to highly cited sources.

**Results.** Modern non-thermal and thermal methods are an environmentally friendly and effective alternative to traditional chemical and thermal processing of food grains. A review of scientific research has shown that in addition to food safety and quality, the use of new technologies is, in most cases, positively correlated with the textural quality of food grains. Sonication causes the internal hydrogen bonds between protein molecules to break, thereby weakening their tertiary and quaternary structures. In addition, ultrasound treatment enhances the hydrolysis of starch and reduces its viscosity. Treatment with a pulsed electric field can cause configurational and molecular changes in the biomacromolecules of raw materials. As a result of radio frequency heating, an increase in the swelling of granules occurs, which leads to easier gelatinization and retrogradation of starch, while reducing the stability of the starch dough. Microwave heating results in the formation of denser and more uniform pores and structures within the sample, thereby promoting the formation of a starch hydration gel network. However, there are unresolved problems in the process of using modern grain processing technologies. Differences in equipment design, modes, and operating conditions do not allow us to fully assess the impact of these methods on the consistency of food grains.

**Conclusions.** In order to maximize the benefits of modern non-thermal and thermal technologies, in-depth studies of their influence on the textural properties of various types of grains and legumes are required, while ensuring the selection and development of processing parameters for each type of food grain. The results of this review may be of interest for further scientific research, as well as for food industry specialists in order to introduce these advanced technologies. Industrial implementation of modern technologies can become an effective alternative to traditional methods of processing grains and legumes

## KEYWORDS

food grain, drying, pre-treatment, texture, ultrasound, cold plasma, pulsed electric field, microwave heating, radio frequency heating, infrared heating



**To cite:** Burak, L. Ch., & Sapach, A. N. (2024). Improving technological properties of food grain through the use of modern technologies: Scoping review. *Health, Food & Biotechnology*, 6(1), 40–64. <https://doi.org/10.36107/hfb.2023.i1.s165>

## ВВЕДЕНИЕ

Объем ежегодного мирового производства зерна в период с 2019 по 2022 год более 2200 млн тонн, что составляет 34,4 % рациона человека и 65 % кормов для скота во всем мире (IGC, 2023; Jimoh et al., 2023). Согласно имеющимся данным, практически во всех странах, в рационе питания потребление цельнозерновых диетических продуктов значительно ниже рекомендуемого. В Северной Европе каждый человек потребляет около 50 г цельного зерна ежедневно, в то время как в США, Юго-Восточной Азии и других частях мира ежедневно потребляется только 20 г цельного зерна (Yang et al., 2023). Загрязнение микроорганизмами и вредителями является серьезной проблемой в зерноперерабатывающей промышленности, поскольку они влияют как на качество зерна, так и на количество. В связи с этим, исследование и дальнейшее промышленное внедрение эффективных и действенных методов и способов снижения послеуборочных потерь зерна является важным и необходимым (Ling et al., 2020). На эффективность традиционных методов термической обработки оказывает влияние конвекция и теплопроводность, которые происходят между нагреваемым материалом и поверхностью продукта, а также внутри продукта (Bassey et al., 2022). Одним из наиболее важных послеуборочных процессов, направленных на сохранение качества зерна, является его сушка, которая должна выполняться перед хранением (Homaioonfal & Malekjani, 2023). Из-за чрезвычайно низкой теплопроводности продовольственного зерна (в среднем: 0,5 Вт/м К) (Homaioonfal & Malekjani, 2023) такая термическая обработка, как правило, требует значительного времени. Использование более высоких температур во время традиционного процесса сушки может привести к нежелательному ухудшению качества зерна, характеризующемуся потерей текстуры, пористостью, микроструктурными изменениями и ухудшением внешнего вида, что делает пищевой продукт неприемлемым для покупателей (Lian et al., 2022). Кроме того, термическая обработка имеет такие недостатки, как снижение количества термочувствительных компонентов, изменение технологических и реологических свойств зерна, а также изменение органолептических показателей продукта (Nath et al., 2023). Для максимального удовлетворения запросов современного потребителя необходимы альтернативные эффективные нетермические и тепловые методы, такие как ультразвук, импульсное электрическое поле (PEF), холодная плазма, радиочастотная (RF), микроволновая (MW) и инфракрасная (IR) обработки, которые повышают эффективность сушки и сохраняют текстуру и пищевую ценность продукта (Boateng, 2022).

Ультразвуковые волны оказывают существенное влияние на текстуру и структуру продуктов питания в зависимости от вида, условий эксплуатации и технологиче-

ских параметров обработки. Звуковые волны высокой и низкой интенсивности могут повредить структуру тканей за счет кавитирующих микропузырьков, что приводит к снижению тургорного давления и получению более мягкой текстуры обработанных пищевых продуктов (Aslam et al., 2022). В качестве инновационного метода нетермической обработки становится все более популярной холодная плазма (CP) по причине высокой эффективности, отсутствию образования химических остатков и экологически чистого воздействия (Chen et al., 2019). Получение плазмы происходит путем ионизации газов из электрических, тепловых, оптических и радиационных источников (Mahendran et al., 2017). Эффективность использования холодной плазмы включает улучшение функциональных свойств белковых изолятов и крахмала, повышение активности амилазы и скорости поглощения воды, изменение содержания влаги в образцах и усиление окисления липидов, что влияет на текстурные характеристики. Более того, обработка плазмой может эффективно контролировать микробные популяции в зерне (Shanker et al., 2023). Импульсное электрическое поле (PEF) способствует сохранению исходных питательных веществ и органолептических свойств без побочных эффектов термической обработки, что наиболее приемлемо для обработки жидких пищевых продуктов (Bai et al., 2021). Например, технология PEF с напряженностью электрического поля в диапазоне от 20 до 250 кВ/см в течение более коротких периодов времени (мс или мкс) может применяться для пастеризации пищевых продуктов при температурах ниже 30–40 °С, что намного ниже температур термической обработки (Wang et al., 2018). Однако PEF влияет на целостность структур зерновых клеток и рыхлость крахмальных гранул (Devraj et al., 2020). В процессе радиочастотной обработки, процессе диэлектрического нагрева, обычно используют электромагнитное излучение частотой 1–100 МГц для проникновения в продукт и выработки внутреннего тепла (Jiao et al., 2018). Соответственно, радиочастотная сушка больше подходит для обработки сыпучих материалов и больших объемов обрабатываемого сырья. Эффект объемного нагрева при радиочастотной обработке повышает скорость сушки за счет быстрого и равномерного нагрева материалов, тем самым улучшая качество зерна (Mahmood et al., 2022).

Микроволновой нагрев (MW) — это неионизирующее излучение с альтернативными электромагнитными полями, которые взаимодействуют с химическими компонентами пищевых продуктов на частотах 915 или 2450 МГц, что приводит к мгновенному выделению тепла, вызванному молекулярным трением (Mahalaxmi et al., 2022). Следует отметить, что за счет энергии MW вода, содержащаяся в пищевых продуктах, быстро переносится в среду во время вакуумной сушки MW, предотвращая тем самым структурный коллапс и усадку,

а также сохраняя текстурные свойства пищевых продуктов (Kutlu et al., 2022).

В последнее время наблюдается повышенное внимание исследователей к инфракрасной сушке (IR-сушка), поскольку она способствует одновременному нагреву поверхности и внутренней части пищевых продуктов (Areesirisuk et al., 2023). IR-обработка вызывает агломерацию крахмал-белковых и крахмал-крахмальных частиц. Это также влечет перегруппировку молекул крахмала, увеличение количества конформаций и конденсацию полимера, что, в свою очередь, увеличивает распределение энергии связи и модификацию молекул крахмала. Кроме того, IR-обработка уменьшает окисление белка и улучшает стабильность и вкус белка во время хранения за счет подавления образования карбонильных соединений. Свободные сульфгидрильные (SH) группы необратимо окисляются с образованием дисульфидных связей (SS), которые затем образуют поперечные связи внутри крахмала, влияя на желатинизацию зерна (Ding et al., 2023).

Текстура является одним из наиболее важных показателей для потребителей при оценке качества и общей приемлемости пищевых продуктов. Понимание молекулярных механизмов и микроструктуры, лежащих в основе текстурных изменений, может помочь оценить влияние каждой операции обработки на качество продукта и предпочтения потребителей. При переработке пищевых продуктов растительного происхождения изменения в клетках и тканях можно использовать для оценки текстурных и структурных параметров для контроля качества в пищевой цепи промышленного производства (Kutlu et al., 2022; Pandiselvam, Tak et al., 2022).

За последнее десятилетие вопросы разработки и применения нетермических и термических технологий в технологических процессах сушки, оттаивания, пастеризации, дезинфекции и дезинсекции всесторонне изучены (Gao et al., 2023; Sakudo et al., 2019). Следует отметить, что наряду с положительным влиянием современных развивающихся технологий и методов обработки на пищевую ценность продуктов, снижении времени обработки, экономии энергоресурсов, не менее важно выяснить их влияние на технологические свойства продовольственного зерна, к которому они применяются. Текстурные характеристики являются одними из наиболее важных элементов, влияющих на внешний вид продукта и соответственно выбор потребителями пищевых продуктов (независимо от того, обработаны они или нет). На момент написания данной статьи нами не установлены критические обзоры результатов научных исследований по улучшению текстурных свойств продовольственного зерна с использованием новых термических и нетермических технологий. Поэтому основная цель данной статьи — провести критический

анализ, систематизацию и обобщении результатов научных исследований фундаментальных принципов и преимуществ технологий термической и нетермической обработки и их влиянию на технологические свойства продовольственного зерна.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Базы данных и временные рамки

Поиск зарубежной научной литературы на английском языке по вопросам влияния современных термических и нетермических технологий на технологические свойства продовольственного зерна проводили в международных библиографических базах «Scopus», «Web of Science», «Elsevier», «Google Scholar». Материалами для исследования послужили 143 статьи. В качестве временных рамок для обзора научных публикаций был принят период 2015–2023 гг. Более ранние научные статьи изучали только при отсутствии новых публикаций по теме исследования. При выполнении работы применяли методы анализа, систематизации и обобщения.

### Критерии включения и исключения источников

Для поисковых запросов в зарубежных базах данных «Scopus», «Web of Science», «Elsevier», «Google Scholar» были использованы следующие ключевые слова и словосочетания: *food grain, drying, pre-treatment, technological properties, ultrasound, cold plasma, pulsed electric field, microwave heating, radio frequency heating, infrared heating*.

Критерии включения и исключения для статей, подлежащих анализу, были следующими:

Критерии включения:

- (1) Статья написана в период 2015–2024 год;
- (2) Статья соответствует теме исследования;
- (3) Типы анализируемых статей — оригинальные исследовательские статьи, обзорные статьи и краткие отчеты.

Критерии исключения:

- (1) Статья не соответствует теме данного обзора: не касаются тематики влияния термических и нетермических технологий на текстурные свойства продовольственного зерна.
- (2) Статья написана не на английском языке;
- (3) Содержание статьи дублируется. Если из разных баз данных или разных электронных библиотечных систем были извлечены повторяющиеся источники, 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 PRISMA и составили схему проведения исследования (Рисунок 1).

## Извлечение и анализ данных

Для анализа источников и поиска ответов на поставленные вопросы исследования: рассмотреть влияние обработки продовольственного зерна современными термическими и нетермическими способами на текстурные свойства, изменения химического состава и микроструктуры клеток тканей; анализ изменения качественных показателей и пищевой ценности продовольственного зерна в результате обработки ультразвуком, импульсным электрическим полем, холодной плазмой, микроволновой, радиочастотной энергией, действия современных термических и нетермических методов в качестве предварительной обработки перед сушкой зерна, уделяя особое внимание изменению физико-химических показателей и пищевой ценности сушеной продукции; преимущества и ограничения применения современных технологий. Извлекались данные из 143 статей, соответствующих критериям включения, и вносились в Таблицу 1.

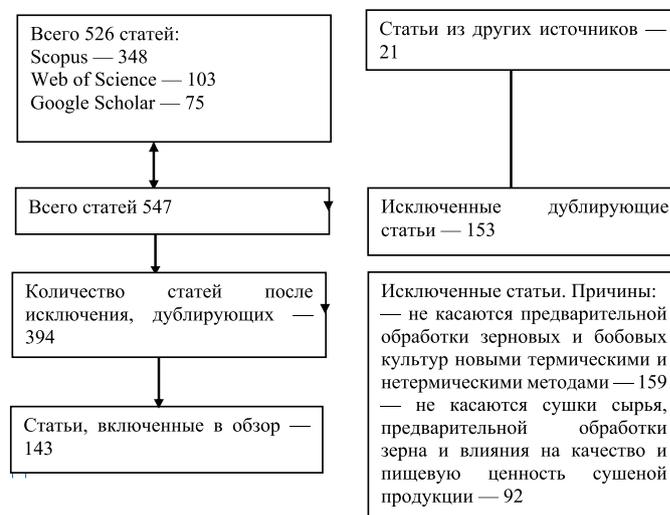
Таблица 1

Пример извлечения данных из статей, включенных в обзор

№	Заглавие	Автор и год	Влияние термической технологии обработки, параметров на структуру и свойства зерна или продуктов переработки	Основные принципы обработки современной технологии	Влияние предварительной обработки на изменение качественных показателей зерна, или продукции его переработки	Преимущества и недостатки используемой технологии
1	Different effects of radio frequency and heat block treatments on multi-scale structure and pasting properties of maize, potato, and pea starches.	Zhou, D., Yang, G., Tian, Y., Kang, J., & Wang, S 8 (2023)	RF and HB treatments were applied on maize, potato and pea starches, and the modification on the multi-scale structure and pasting properties of starch was monitored completely. The changes of granular morphology, semi-crystalline layer, long- and short-range ordered structures of maize, potato and pea starches were found to be dependent on not only the treatment methods but also the average heating rate	RF energy is a high frequency alternating electromagnetic wave with a frequency ranging from 3 kHz to 300 MHz and a wavelength in the range of 1 m–100 km	Results showed that the heating uniformity index $\lambda$ of samples ranged from 0.003 to 0.008, and there was no significant difference in heating uniformity between RF and HB treatments under the same conditions. Compared with the HB treatment, there were more cracks, larger pores, and more debris on the surface of RF treated potato, maize and pea starch granules. After RF treatment, the internal structure of starch was less compact and the crystal layer was thicker using small angle X-ray scattering.	RF treatment tends to destroy granule structure, reduce crystallinity and short-range order structure, change the ratio of $\alpha$ -helix, $\beta$ -sheet and random coil, and affect the physicochemical properties of various components. Therefore, it is necessary to characterize the fine structure of protein and starch and study their physicochemical properties after RF treatment of grain

Рисунок 1

Блок-схема, описывающая процесс выбора исследования, в соответствии с протоколом PRISMA



Примечание. PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR): Checklist and Explanation, 2018 (<https://www.acpjournals.org/doi/10.7326/M18-0850>)

Окончание Таблицы 1

№	Заглавие	Автор и год	Влияние термической технологии обработки, параметров на структуру и свойства зерна или продуктов переработки	Основные принципы обработки современной технологии	Влияние предварительной обработки на изменение качественных показателей зерна, или продукции его переработки	Преимущества и недостатки используемой технологии
2	Molecular functionality of plant proteins from low- to high-solid systems with ligand and co-solute.	Paramita, V. D., Panyoyai, N., & Kasapis, S. (2020)	It was shown that applying a PEF pre-treatment of 1.07 and 4.0 kJ/kg to whole onions prior to drying resulted in a positive change in the drying kinetics. For drying at a constant temperature of 85 °C, the BP was achieved 20 min faster. Moreover, PEF treatment resulted in a 25 % faster drying process.	Studies of soy protein isolate (SPI) dispersion treated with low frequency (20 kHz) ultrasound at different powers (200, 400 or 600 W) and treatment durations (15 or 30 minutes) showed that longer treatment times and intense power significantly reduced the value modulus of elasticity (G'), but expanded the linear viscoelastic region (LVR) of the re-diluted 12.5 % SPI dispersion in the strain test	In studies of plant proteins, low-frequency ultrasound of 20–100 kHz and power in the range of 100–1000 W/cm <sup>2</sup> changed the structural properties of plant proteins due to the strong shear and mechanical forces generated by the cavitation phenomenon. This phenomenon causes changes in protein conformation by exposing sulfhydryl groups and increasing hydrophobic regions on the protein surface, which affects the functionality of plant proteins.	High intensity ultrasonic wave can cause aggregation of numerous plant protein extracts (pea, canola, albumin seeds) suspended in aqueous solution. The longer sonication period promoted protein-water interactions, resulting in a broad size distribution of broken microparticles in the protein suspension
3	Pulsed electric field-induced modification of proteins: A comprehensive review	Shams, R., Manzoor, S., Shabir, I., Dar, A. H., Dash, K. K., Srivastava, S., Pandey, V. K., Bashir, I., & Khan, S. A (2023).	PEF treatment changes the secondary and tertiary structure of proteins in various foods, as well as their technical and functional qualities. Increasing the electric field strength can improve the emulsifying properties of proteins and protein-polysaccharide complexes. As the duration of PEF treatment increases, unfolded protein molecules can interact hydrophobically and covalently to form aggregates.	Effective electro-poration improved the membrane permeability of the highly lignified palisade layer in the black bean kernel shell, not just the basal region, which resulted in loss of structural integrity and therefore explained the softness of PEF-treated black beans. It should also be noted that the application of PEF improved other textural qualities of raw black beans, despite a decrease in hardness	Depending on the intensity of processing of the food matrix and the properties of the proteins present in the food, PEF treatment modifies the conformational structure of proteins, contributing to changes in their physicochemical and functional properties	

*Примечание.* Из «Zhou, D., Yang, G., Tian, Y., Kang, J., & Wang, S. (2023). Different effects of radio frequency and heat block treatments on multi-scale structure and pasting properties of maize, potato, and pea starches. *Food Hydrocolloids*, 136, 108306», «Paramita, V. D., Panyoyai, N., & Kasapis, S. (2020). Molecular functionality of plant proteins from low- to high-solid systems with ligand and co-solute. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(7), 2550», «Shams, R., Manzoor, S., Shabir, I., Dar, A. H., Dash, K. K., Srivastava, S., Pandey, V. K., Bashir, I., & Khan, S. A. (2023). Pulsed electric field-induced modification of proteins: A comprehensive review. *Food and Bioprocess Technology*, 2023, 1–33».

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Влияние современных нетермических технологий на технологические свойства продовольственного зерна

Реологические и текстурные характеристики пищевого сырья имеют первостепенное значение для потребителей. Технологический процесс получения подходящей текстуры и структуры пищевых продуктов включают методы приготовления или обработки, предполагающие взаимодействие между различными материалами (Jarén et al., 2016). В последнее время исследованы и получили промышленное внедрение различные технологии обработки. В связи с этим, крайне важно понять механизмы, с помощью которых новые технологии, такие как холодная плазма, ультразвук, PEF, RF, MW и IR, влияют на реологические и текстурные свойства пищевых продуктов. В целом влияние термических и нетермических технологий на текстуру зерна определяется условиями обработки, а также типом и структурой зернового сырья, поэтому целесообразно масштабировать разрабатываемые технологии до промышленного уровня и оптимизировать условия их переработки (Pandiselvam, Kothakota, et al., 2022). Восприятие текстуры пищевых продуктов как показателя качества пищевых продуктов представляет собой когнитивный процесс, основанный на сенсорной, оральной и визуальной обработке, который включает в себя все структурные и реологические (поверхностные и геометрические) характеристики пищевых продуктов. Инструментальная оценка текстуры пищи является практичной и эффективной альтернативой органолептической оценке (Pandiselvam, Singh, et al., 2022). Текстуру пищевых продуктов можно определить с использованием конкретных характеристик, определяемых приборами или обученной группой (органолептических) дегустаторов. Анализ профиля текстуры используется для измерения и анализа текстурных свойств, включая реологические свойства, вязкость, твердость, когезионность, упругость, жевательную способность и липкость (Aslam et al., 2021).

#### Предварительная обработка ультразвуком

В пищевой промышленности ультразвук эффективно применяется в качестве экологически безопасного метода замены традиционных методов обработки пищевых продуктов. В данной технологии используются акустические волны с частотой более 20 кГц, которые можно разделить на ультразвук низкой интенсивности (100 кГц–1 МГц) и ультразвук высокой интенсивности или низкой частоты (20–100 кГц) (Nwachukwu & Aluko, 2021). Например, низкочастотный ультразвук (20–100 кГц, мощность 100–1000 Вт/см<sup>2</sup>) влияет на структурные свойства белков бобовых культур за счет развития

сильных механических и сдвиговых сил и воздействия SH-групп, влияя таким образом на их техногенность и функциональные свойства при дальнейшем использовании растительных белков (Paramita et al., 2020; Sridhar et al., 2022). Flores-Silva et al. (2017) установили, что ультразвуковая обработка (24 кГц в течение 16 мин) изменяла состав крахмала в процессе желатинизации, увеличивая содержание резистентного крахмала и фракций быстроусвояемого крахмала. Ультразвуковая обработка улучшает морфологию крахмальных гранул, приводя к образованию большого количества короткоцепочечных молекул амилозы при желатинизации, которые обладают низкой устойчивостью к активности амилазы при расщеплении *in vitro*. Крахмал, обработанный ультразвуком, имеет более низкую температуру желатинизации, чем нативный крахмал, и, таким образом, приводит к увеличению расширения гранул при нагревании. Поскольку ультразвук разрушает поверхность крахмальных гранул, он увеличивает их способность набухания и растворимость в воде, одновременно снижая их клейящие свойства, кристалличность, вязкость пасты и относительную степень полимеризации (Kong, 2019). Ультразвуковая обработка, как нетермический метод, эффективна в применении для термочувствительных пищевых продуктов, поскольку она сохраняет их питательные, сенсорные и функциональные свойства, одновременно увеличивая срок их хранения и микробиологическую стабильность (Juodeikiene et al., 2020). Ультразвуковая обработка обычно используется для изменения текстуры, улучшения массообмена и анализа пищевых продуктов (Barbhuiya et al., 2021). В процессе исследования твердость замоченных соевых бобов снизилась на 30 % после обработки ультразвуком из-за желатинизации крахмала и пектина при нагревании. Более того, размягчение белковой матрицы и разрушение средней пластинки соевых бобов также снизили их твердость (Zhang, Hu, et al., 2021). Применение ультразвуковой обработки различной интенсивности и мощности способно характеризовать механизмы, с помощью которых ультразвуковые параметры влияют на свойства белка и крахмала, что может быть полезно для улучшения текстурных свойств зерновых продуктов во время обработки (Bonto et al., 2021).

#### Механизмы действия и применение предварительной обработки ультразвуком для улучшения технологических свойств продовольственного зерна

Ультразвуковая обработка усиливает поглощение воды посредством процессов прямого действия, связанных с быстрыми попеременными сокращениями и расширениями тканевого матрикса, а также косвенного действия, связанных с разрушением клеток и образованием микроканалов, вызванными акустической кавитаци-

ей. Образование трещин усиливает массообмен за счет увеличения пористости материала. Образование микроканалов было установлено в зернах сорго с высокой активностью воды (Miano et al., 2016) и в зернах риса (Bonto et al., 2021), в то время как это не подтверждается для зерен кукурузы (Miano et al., 2017). Это дает возможность предположить, что активность воды и структурные различия могут влиять на механизм действия (Mazi et al., 2023). Более того, интенсивность и время воздействия влияют на структуру белка, поэтому важно выбрать подходящий уровень обработки. Физические изменения, вызываемые во время вспенивания с помощью ультразвука, должны частично способствовать денатурации белковых цепей и проникновению пузырьков воздуха, сохраняя при этом стабильность текстуры (Aslam et al., 2022). Структурные изменения белков во время обработки пищевых продуктов могут повлиять на их функциональность. Физические силы, возникающие в результате кавитации, объясняются воздействием ультразвука на конформационные и структурные свойства пищевых белков (Barbhuiya et al., 2021). Результаты более раннего исследования показывают, что правильная ультразвуковая обработка (4°C) способствовала образованию более однородной и компактной микроструктуры геля лиофилизированного изолята соевого белка (SPI), тем самым увеличивая его эластичность, твердость, жевательную способность и когезионную способность после регидратации. Сообщается, что текстурные характеристики гелей SPI связаны с содержанием в них воды, микроструктурой и составом. Во время замораживания геля SPI из белковой сети высвобождается плохо связанная и текучая вода, что приводит к образованию кристаллов льда с более низкой плотностью. С увеличением количества воды, высвобождаемой из белковой сети, белок-водные взаимодействия медленно заменяются белок-белковыми взаимодействиями, улучшая эластичность, твердость, жевательную способность и когезивность гелей SPI. И наоборот, процесс регидратации медленно смягчает текстуру, повышает эластичность и снижает твердость гелей SPI (Liang et al., 2021). Более того, SH и водородные связи глютена могут быть разрушены высокой мощностью ультразвука, что приводит к уменьшению содержания глютена. Высокое давление и температура обработки ультразвуком могут также отрицательно влиять на водородные связи между молекулами белка и глютена, ослабляя их четвертичные и третичные структуры и приводя к рыхлой сетевой структуре (Сао et al., 2023). В другом исследовании текстура образцов аквафабы, обработанных при 50 % мощности оборудования, существенно не изменилась; однако образцы, обработанные при 100 % мощности, имели более твердую текстуру (Meurer et al., 2020). После применения ультразвука твердость пророщенных образцов красного и коричневого риса снизилась на 43,4 % и 39,2 %, соответственно. Поскольку твердость риса является критическим параметром, определяющим продолжительность

его приготовления, проросший рис, обработанный ультразвуком, должен иметь более короткое время приготовления на пару. Кроме того, обработка ультразвуком усиливает гидролиз крахмала и снижает его вязкость (Ding et al., 2018).

### **Ограничения в крупномасштабном применении ультразвуковой обработки продовольственного зерна и пути дальнейшего развития**

Высокоинтенсивная ультразвуковая обработка увеличивает твердость, прочность и водоудерживающую способность гелей SPI, индуцированных глюконовой кислотой-дельта-лактоном (ГДЛ). Более того, применение ультразвука вызывает агрегацию белка, а также денатурацию и сворачивание структуры белка, тем самым влияя на текстуру и функциональные свойства тофу GDL (Liang et al., 2021). Обработанные ультразвуком белки рисовой лапши, пищевые волокна и липиды способствуют образованию амилозо-липидных комплексов V-типа и повышают относительную кристалличность. Увеличение структуры V-типа и относительной кристалличности приводит к снижению содержания перевариваемого крахмала в рисовой лапше (Geng et al., 2021). В сочетании с обработкой трансглутаминазой ультразвук может стимулировать реакции сшивания между белками и увеличивать их твердость и липкость. Кроме того, ультразвуковая обработка может изменить конформацию белка, способствовать распределению крахмала в белковых структурах и увеличить сшивку белков глютена (Li, Guo et al., 2023). Поскольку предпочтения потребителей в отношении сенсорного восприятия сушеных продуктов различаются, температурные условия эксплуатации можно регулировать в зависимости от желаемых текстурных характеристик. Например, высокоинтенсивная ультразвуковая обработка может помочь в разработке мягких белково-крахмальных гелей из зерен с рядом текстурных характеристик, подходящих для потребителей, страдающих дисфагией (Ji et al., 2023). Тем не менее, целесообразно провести дальнейшие исследования по применению ультразвуковой технологии и ее связи со структурой пищевых продуктов, чтобы получить более глубокое понимание процесса и его влияния на параметры продукта, с целью промышленного использования для производства продуктов питания с улучшенной функциональностью и текстурой.

### **Предварительная обработка холодной плазмой**

Холодная плазма — это нетермический метод, основанный на использовании свободных радикалов, атомов, ионов и фотонов в высокоэнергетическом состоянии во время обработки пищевых продуктов. Одним из пре-

имущества данного метода является сохранение химического состава пищевых продуктов. Обработка холодной плазмой способна улучшать функциональные свойства белковых изолятов, крахмала и риса за счет молекулярных и поверхностных модификаций (Shanker et al., 2023). Более того, химические реакции между полимером крахмала и частицами плазмы, в основном кислородсодержащими группами, такими как карбоксильные, гидроксильные и карбонильные группы, приводят к функционализации крахмала. Предполагается, что изменения крахмала, вызванные обработкой плазмой, опосредуются деполимеризацией, реакциями сшивания и функционализацией (Barbhuiya et al., 2021). Холодная плазма – это простой и безопасный метод, который повышает содержание резистентного крахмала и обеспечивает структурную модификацию и сохранение зерна эффективнее, чем при традиционной обработке зерна (Shanker et al., 2023).

### Механизм и применение предварительной обработки холодной плазмой для улучшения технологических свойств продовольственного зерна

Поверхностная абляция/ травление, вызванное активными видами плазмы, вызывает изменения текстуры и кулинарных свойств продовольственного зерна. Увеличение поверхностной энергии и уменьшение угла смачивания образцов, обработанных плазмой, свидетельствует об эффективном внедрении полярных групп на поверхность рисовых зерен (Thirumdas et al., 2016). Применение холодной плазмы разрушало оболочку семян сои и улучшала водопоглощение, тем самым уменьшая твердость ростков сои (Ji et al., 2022) (Таблица 1). Холодная плазма содержит высокую концентрацию активных кислородных веществ, которые могут окислять свободные SH-группы полипептидных цепей белков и образовывать SS-связи во время реги-

дратации, что приводило к образованию плотной структуры на поверхности, увеличивало твердость свежей влажной лапши (Chen et al., 2020). Жевательная способность, упругость и эластичность гречихи значительно увеличиваются после прорастания и еще больше усиливаются, когда проросшие зерна гречихи предварительно обрабатываются холодной атмосферной плазмой. И наоборот, пророщенные зерна гречихи, обработанные холодной плазмой, обладают пониженной твердостью. Изменения устойчивости тесно связаны с параметрами эластичности. Повышенную эластичность, упругость и разжевываемость пророщенных зерен гречихи, обработанных плазмой, можно объяснить формированием сетчатой структуры и гидратирующим эффектом белков гречихи. По сравнению с необработанной гречкой в пророщенных зернах гречихи, обработанных холодной плазмой, увеличивается гидратация белка, а также белок-крахмальные и белок-белковые взаимодействия, что увеличивает силу деформации и облегчает обработку гречневого теста. Вместе с тем, прорастание в условиях холодного атмосферного плазменного стресса не оказывает существенного влияния на склеивание и адгезивность (Guiyun et al., 2022). Вышеупомянутые результаты исследований показывают, что обработка холодной плазмой приводит к окислению белка и повышает прочность теста из обработанной пшеничной муки (Bahrami et al., 2016). Клейкость и твердость являются важными параметрами, связанными с гидратацией крахмальных гранул. Установлено, что адгезивность положительно коррелировала, тогда как твердость отрицательно коррелировала с обработкой плазмой, с диапазонами между 0,064 и 0,205 Н и 19,30 и 12,36 Н, соответственно. Такое снижение твердости и увеличение клейкости может быть связано с выщелачиванием крахмала, деполимеризацией углеводной фракции или поверхностных частиц с более низкой молекулярной массой, а также повышенной текучестью и желатинизацией крахмала после применения холодной плазмы (Sarangapani et al., 2017).

Таблица 2

Обзор основных результатов влияния новых термических технологий на свойства продовольственного зерна и продуктов его переработки

Наименование нетермической технологии обработки	Вид обрабатываемого сырья	Параметры обработки	Результаты обработки	Источник
Ультразвуковая обработка	Фасоль маш	250 Дж/мл в течение 2 мин.	Обработка ультразвуком высокой мощности улучшила упругость, когезивность, липкость, жевательную способность и устойчивость гелей.	Rahman and Lamsal (2023)
Обработка импульсным электрическим полем	Черные бобы	Импульсные электрические поля/ PEF (напряженность электрического поля 1–2 кВ/см, удельная энергия 9–127 кДж/кг)	Увеличение напряженности электрического поля оказало значительное негативное влияние на твердость черных бобов.	Alpos et al. (2022)

Окончание Таблицы 2

Наименование нетермической технологии обработки	Вид обрабатываемого сырья	Параметры обработки	Результаты обработки	Источник
Обработка холодной плазмой	Гречиха	Стрессовая обработка холодной атмосферной плазмой (50 Вт в течение 40 с) семян гречихи (BW) с последующим проращиванием при 30°C в течение 60 ч.	Установлена тенденция к снижению твердости у пророщенной гречихи, обработанной холодной атмосферной плазмой, по сравнению с пророщенной гречкой ( $p < 0,05$ ).	Guiyun et al. (2022)
Обработка холодной плазмой	Ростки сои	Холодная плазма различного времени действия (0, 30, 60, 120 и 180 с)	Твердость ростков сои снизилась, а их хрупкость увеличилась после умеренной обработки холодной плазмой.	Ji et al (2022)
Обработка импульсным электрическим полем	Нут	Обработка импульсным электрическим полем (2,5 и 3,3 кВ/см, от 0,2 до 12,0 кДж/кг, длительность импульса 15 мкс, частота 20 Гц)	Результаты показали, что прочность образцов, обработанных импульсным электрическим полем, во всех исследованных условиях снижалась с увеличением энергозатрат по сравнению с необработанным образцом.	Andreu et al (2021)
Ультразвуковая обработка	Изолят соевого белка	Для оценки эффективности ультразвуковой обработки (4 °C) применялись различные уровни мощности ультразвука (0, 100, 200, 300, 400 и 500 Вт).	Ультразвуковая обработка (4 °C) усилила белок-белковое взаимодействие, увеличила количество белков в сетевой структуре и улучшила однородность гелевой сети, а затем улучшила твердость, эластичность, когезионность и жевательную способность геля изолята соевого белка.	Liang et al (2021)
Обработка холодной плазмой	Китайский шлифованный рис	мощность 120 Вт в течение 20 с.	Обработка холодной плазмой значительно сократила время приготовления и твердость приготовленного риса, одновременно увеличив клейкость, эластичность и снижение сухих веществ в кашце.	Liu et al (2021)
Обработка импульсным электрическим полем	Рис	Воздействие импульсного электрического поля напряженностью поля 3 кВ/см 50–300 импульсов	Клейкие рисовые продукты, приготовленные с использованием рисовых зерен, обработанных импульсным электрическим полем, обладали более мягкой текстурой и более приятным вкусом.	Qiu et al (2021)
Ультразвуковая обработка	Пшеничная клейковина	Частота ультразвука составляла 20 кГц, время включения и выключения – 5 с, плотность мощности ультразвука – 20, 40, 60, 80 или 100 Вт/л.	Для всех образцов в процессе замораживания твердость сначала уменьшалась, а затем увеличивалась с увеличением удельной мощности по сравнению с контролем.	Lee et al (2019)

Качество продуктов питания также тесно связано с твердостью и ломкостью зерна. Обработка холодной активированной плазмой водой не оказала существенного влияния на твердость или ломкость ростков сои. Однако, как установлено при длительной обработке холодной плазмой твердость проростков снизилась на 39,86 % в дистиллированной воде и на 35,92 % в воде, активированной холодной плазмой (Ji et al., 2022). Это снижение можно объяснить длительной обработкой холодной плазмой, которая повреждает клетки ростков сои. Однако ни вода, активированная холодной плазмой, ни обработка холодной плазмой не оказали существенного влияния на когезивность, упругость, жевательную

способность или липкость (Ji et al., 2022). Обработка холодной плазмой мощностью 120 Вт в течение 20 с значительно снижает твердость, но повышает эластичность и клейкость рисовых зерен (Liu et al., 2021). Подобное снижение твердости указывает на то, что выщелачивающие компоненты могут быть ответственны за увеличение клейкости и снижение твердости образцов вареного риса. Более того, значение твердости вареного риса снижается с увеличением мощности и времени применения плазменной обработки (Tirumdas et al., 2016). Кроме того, обработка холодной плазмой не делала тесто более липким, что могло быть эффективным с точки зрения сохранения органолептических качеств гречки. В целом,

дифференциальная сканирующая калориметрия, реология и оценка текстуры показали, что порошок пророщенной гречихи, подвергнутый воздействию холодной плазмы, обладает лучшими технологическими характеристиками, чем проросшая гречка и порошок гречихи (Guiyun et al., 2022). Пшеничная мука, активированная плазмой и обработанная водой, показала снижение вязкости, возможно, из-за присутствия кислотных компонентов в цепях крахмала, активированного плазмой и гидролизованного водой (Zambelli et al., 2018). Кроме того, кислотные компоненты активированной плазмой воды гидролизуют белки, в результате чего образуются хрупкие набухшие гранулы крахмала, что еще больше снижает вязкость пшеничной муки (Chung et al., 2012). В условиях высокой температуры и высокого сдвига вязкость разрушения отражает термическую стабильность набухших гранул крахмала (Trung et al., 2017).

### **Ограничения в крупномасштабном применении обработки холодной плазмой продовольственного зерна и пути дальнейшего развития**

Плазменная обработка приводит к потере влаги с поверхности зерен, что оказывает влияние на текстуру и внешний вид арахиса и снижала его товарный вес (Gebremical et al., 2019). В другом исследовании установлено, что большее количество связей SS и чрезмерное увеличение гидрофобных связей во время гелеобразования дисперсии белка, обработанной холодной плазмой, приводят к образованию более твердых гелей, что отрицательно влияет на их текстурные характеристики (Rahman & Lamsal, 2023). Взаимодействия между белками и плазмой сложны и остаются недостаточно изученными. В связи этим необходимо продолжить исследования с целью установления механизмов плазменно-индуцированных изменений и их влияния на структурные и текстурные свойства зерна, а также выяснения процесса, с помощью которого холодная плазма модифицирует крахмал, инактивирует микробы и изменяет структуру белков действием при различных параметрах обработки. Кроме того, научным приоритетом должна стать оценка влияния обработки холодной плазмой на пищевую ценность и органолептические качества зерна.

### **Предварительная обработка импульсным электрическим полем (PEF)**

Во время обработки PEF в диапазоне 0,1–100 кВ/см<sup>2</sup> импульсы электрического поля неоднократно воздействуют на продукты питания, расположенные между электродами. PEF вызывает электропорацию клеток в твердых пищевых продуктах и поэтому используется

в качестве метода предварительной обработки при сушке, экстракции, очистке и приготовлении пищи за счет усиления массопереноса (Zhang, Lyu, et al., 2023). В зависимости от интенсивности обработки пищевой матрицы и свойств белков, присутствующих в пищевых продуктах, обработка PEF модифицирует конформационную структуру белков, способствуя изменению их физико-химических и функциональных свойств (Shams et al., 2023). Кроме того, крахмал, обработанный PEF быстро клейстеризуется из-за массивной перестройки и разрушения его молекулярной структуры во время применения PEF с высокой напряженностью поля. После обработки PEF структурные изменения в крахмале воскообразного риса влияют на структуру перевариваемости, тем самым увеличивая содержание быстроперевариваемого крахмала (RDS) и одновременно снижая содержание медленно перевариваемого крахмала (SDS) по сравнению с таковым в нативном крахмале (Zeng et al., 2016). Аналогично, в другом исследовании установлено, что увеличение интенсивности электрического поля значительно увеличивает RDS, но снижает SDS и крахмала гороха (Li, Wu et al., 2019). Обработка PEF положительно влияет на качество пищевых продуктов, благодаря снижению деградации биологически активных веществ и максимальному сохранению органолептических показателей в процессе обработки (Qiu et al., 2021). Предварительная обработка импульсным электрическим полем перед сушкой обеспечивает сокращение времени сушки, снижение энергоемкости и сохранение биологических операций в готовом продукте.

### **Механизм и применение обработки PEF для улучшения технологических свойств продовольственного зерна**

Обработка PEF может изменить технологические и физико-химические свойства пищевых продуктов, вызывая конфигурационные и молекулярные изменения в биомакромолекулах сырья (Qiu et al., 2021). Сканирующая электронная микроскопия показала, что предварительная обработка PEF приводит к образованию однородно пористых зерен риса, создавая эффективную структуру каркаса, которая способствует жеванию и упругости приготовленного риса (Bai et al., 2021). Сообщается, что электропорация под воздействием PEF также увеличивает проницаемость клеточных мембран (Gong et al., 2022). Эффективная электропорация улучшила проницаемость мембран сильно лигнифицированного палисадного слоя в оболочке ядра черной фасоли, а не только в прикорневой области, что привело к потере структурной целостности и, следовательно, объяснило мягкость черных бобов, обработанных PEF. Следует также отметить, что применение PEF улучшило другие текстурные качества сырых черных бобов, несмотря на снижение твердости (Alpros et al., 2022). Продукты

из клейкого риса, полученные из полностью приготовленных зерен клейкого риса или муки, имели характерную текстуру из-за клейкости и липкости приготовленного клейкого риса. Как следствие этого, клейкие рисовые лепешки, обработанные PEF, демонстрировали однородный вкус и гладкую текстуру во время обработки пищевых продуктов (Qiu et al., 2021). Установлено, что более высокие значения когезивности могут быть связаны с усиленным взаимодействием между крахмалом и белками, а также с другими макромолекулами в рисовых зернах (Bai et al., 2021). Недавнее исследование показало, что более высокая напряженность электрического поля приводит к более однородной структуре пшеничной клейковины. В хлебобулочных изделиях плотные и равномерно распределенные поры делают текстуру более рыхлой. В результате исследования показано, что обработка PEF влияет на морфологию выпеченных изделий из-за взаимодействия между глютенином и глиадином (изменения SH и SS), а также изменений конформации вторичной структуры глютена (Li, Wu et al., 2019). В процессе обработки PEF размер пор и объем пористых структур на поверхности гранул кукурузного крахмала значительно увеличиваются, вызывая коллапс некоторых из этих структур. Обработка PEF также поляризует гранулы крахмала, повреждая их плотный внешний слой и снижая механическую прочность кукурузного крахмала (Li, Wang, Han et al., 2023). Пористая структура шитых крахмальных гранул аналогична структуре пористых крахмальных гранул, обработанных PEF; однако агрегация крахмала приводит к образованию кластеров крахмала. Это связано с тем, что ковалентные связи, создаваемые сшивающим агентом триметафосфатом натрия внутри молекул крахмала, позволяют небольшой части гранул крахмала в реакционной смеси сшиваться друг с другом и образовывать кластеры крахмала, которые облегчают их адгезию (Luo et al., 2023). Следовательно, твердость образцов, обработанных PEF, снижается с увеличением энергозатрат при всех условиях эксплуатации. В другом исследовании предварительная обработка PEF привела к смягчению тканей нута из-за более быстрого поглощения воды во время регидратации. С увеличением интенсивности обработки PEF (>3,6 кДж/кг) твердость образцов быстро снижается (Andreou et al., 2021). Амилолитические ферменты гидролизуют гликозидные связи в крахмале с образованием растворимой мальтозы и глюкозы (Barman & Dkhar, 2015). Следовательно, в присутствии  $\beta$ -глюкана на гидролиз крахмала отрицательно влияет повышение вязкости и снижение амилолитической активности (Ducque et al., 2022). Сообщается, что содержание амилозы имело значительную положительную корреляцию с жевательной способностью и твердостью, но отрицательную корреляцию с когезивностью. Желатинизация гранул с большим содержанием амилозы во время приготовления затруднена, что приводит к снижению способности к набуханию и увеличению твердости и жева-

тельной способности приготовленной лапши (Hong et al., 2020). Таким образом, гранулы крахмала с улучшенной способностью к набуханию можно использовать для приготовления вареной лапши с мягкой текстурой. Этерифицированный крахмал, индуцированный PEF, более склонен к перевариванию, чем крахмал, модифицированный традиционными методами (Hong et al., 2020; Pu et al., 2017).

### **Ограничения в промышленном использовании обработки продовольственного зерна PEF и дальнейшие перспективы**

Результаты исследования Alpos et al. показали, что следует избегать термической обработки при температуре выше 90 °C без добавления кальция, чтобы предотвратить серьезное ухудшение параметров текстуры (до 70 %) бобов, обработанных PEF, из-за потери структурной целостности, вызванной повышенной температурой (Alpos et al., 2022). С точки зрения промышленного производства предполагается, что производство бобовых с уменьшенным временем регидратации перед приготовлением и одновременным выделением нежелательных углеводов будет иметь более высокий уровень восприятия потребителями (Andreou et al., 2021). Более того, обработка PEF может разрушать клеточные мембраны и изменять механические свойства тканей растений, что приводит к изменению их физических и текстурных свойств. Это важная новая область исследований, которая потенциально может расширить использование обработки PEF в пищевой промышленности, поскольку она предполагает, что более низкая степень набухания крахмала приводит к уменьшению его разрушения при варке, что указывает на значительное снижение вязкости после достижения максимального значения. Несмотря на преимущества обработки PEF, ни в одном из исследований не изучалось влияние обработки PEF на усвояемость крахмала *in vitro* (Barbhuiya et al., 2021). Следовательно, необходимы дальнейшие исследования обработки зерна PEF, чтобы лучше понять влияние импульсов электрического поля на белки.

### **Влияние современных способов термической обработки на технологические свойства пищевого зерна**

#### **Радиочастотный нагрев (RF)**

Обработка с использованием радиочастотной энергии включает в себя электромагнитные волны в диапазоне от 0,3 до 300 МГц, которые вызывают объемный и быстрый нагрев. Данная обработка имеет преимущество

перед другими термическими и традиционными термическими способами обработки (Oke & Baik, 2022; Xie et al., 2022). Обработка радиочастотным нагревом генерирует тепло внутри продукта за счет движения полярных молекул и заряженных ионов в переменном магнитном поле. В более ранних исследованиях изучалось влияние RF-процесса на структурные и функциональные изменения белков, а также кристаллической структуры крахмала для обеспечения эффективной термической обработки продовольственного зерна с лучшими микроструктурными, текстурными и органолептическими показателями (Liu et al., 2021; Mahmoud et al., 2023). Радиочастотные волны являются приемлемым способом обработки из-за их более высокой глубины проникновения и объемных тепловых процессов, которые важны и необходимы для обработки материалов в промышленных масштабах (Oke & Baik, 2022)

Жевательная способность пищи, нагретой радиочастотным излучением, имеет тенденцию уменьшаться с увеличением межэлектродного зазора, но увеличивается с увеличением температуры. Увеличение когезионной

способности приготовленного коричневого риса можно объяснить увеличением прочности межмолекулярных связей охлаждающего крахмала в образцах риса. Аналогично, клейкость рисовых зерен, нагретых радиочастотным излучением, увеличивается с увеличением температуры и скорости воздуха и уменьшается с увеличением межэлектродного зазора. Неорганизованные крахмальные гранулы быстрее гидратируются во время приготовления, проявляя тем самым большую склонность к клейкости. Более длительная радиочастотная обработка вызывает денатурацию белков и желатинизацию крахмала, снижая тенденцию к их связыванию во время приготовления (Mahmood et al., 2023) (Таблица 3). Результаты другого исследования показали, что ни стабильность пенообразования, ни способность к пенообразованию не изменились для образцов, обработанных радиочастотным излучением. Стабильность пенообразования и пенообразующая способность ингредиентов имеют важное значение в производстве продуктов питания, поскольку они способствуют созданию мягкой текстуры пищевых продуктов (Hassan et al., 2019).

**Таблица 3**

*Результаты исследований влияния новых термических технологий на текстурные свойства продовольственного зерна*

Способ обработки	Обрабатываемое сырье	Параметры обработки	Результаты обработки	Источник
RF (РЧ-нагрев)	Рис	Горячий воздух и радиочастотный нагрев при температуре 38°C и 42°C, а также соблюдение этих свойств после 6 месяцев хранения	Твердость вареного риса достигла своего максимального значения между 4 и 5 месяцами. Однако клейкость уменьшалась по мере увеличения срока хранения	Chitsuchipakorn and Thanapornpunpong (2023)
IR-нагрев	Рис	Инфракрасную нагревательную пластину устанавливали на мощность 2780 Вт/м <sup>2</sup> и давали ей стабилизироваться в течение 20 минут, а рисовые зерна немедленно удаляли при достижении 60°C; затем печь, нагретая до 60°C, для закалки образца риса в течение 4 часов	Упругость образцов риса увеличивается после инфракрасной обработки из-за разрушения молекул крахмала, что увеличивает гидратационную способность и водопоглощение.	Dean et al (2023)
RF (РЧ-нагрев)	Коричневый рис	Исследовано влияние межэлектродного зазора (100, 110, 120 мм), температуры (50°C, 55°C, 60°C) и скорости движения воздуха (0,5, 1,5, 2,5 м/с) на качество риса.	Твердость и клейкость высушенных образцов увеличились после обработки горячим воздухом, однако статистически незначимо по сравнению с образцами, высушенными горячим воздухом.	Mahmoud et al. (2023)
MW (Микроволновой нагрев)	Рис	Образцы, высушенные микроволновой печью, обрабатывались при определенных энергиях в диапазоне от 360 до 630 кДж/кг исходной влажной массы зерна (кДж/кг зерна).	Твердость значительно возрастала с увеличением удельной микроволновой энергии при различной продолжительности хранения образцов. Использование микроволн для сушки свежеобранного риса ускоряет его старение и повышает твердость приготовленного риса, что желательно для потребителей.	Bruce et al (2022)

Окончание Таблицы 3

Способ обработки	Обрабатываемое сырье	Параметры обработки	Результаты обработки	Источник
IR -нагрев	Ячменная мука	Образец выпекали в инфракрасной пищевой печи СК-2 при температуре нижнего нагрева $150 \pm 5^\circ\text{C}$ и температуре верхнего нагрева $170 \pm 5^\circ\text{C}$ в течение 20 мин.	После обработки в дальнем инфракрасном диапазоне на поверхности горного ячменя не было трещин, и это не оказывало очевидного эффекта вздутия на зерно высокогорного ячменя.	Dang et al (2022)
Микроволновая обработка	Фасоль	Мощность МВт была установлена на уровне 0,8 Вт/г, а температура горячего воздуха была установлена на уровне 60–80°C.	Органолептические показатели, твердость и липкость сушеных бобов после варки значительно снизились при сушке горячим воздухом MW.	Lee et al (2022)
RF- нагрев	Арахис	Для поддержания конечной температуры арахиса ниже 40°C температура горячего воздуха составляла 35°C, расстояние между электродами составляло 140 мм при скорости воздуха 1,5 м/с.	Арахис, высушенный комбинированным методом, имел лучшие органолептические показатели. Данный метод имеет преимущества для сушки арахиса по сравнению с импульсной вакуумной сушкой и сушкой горячим воздухом.	Xie et al (2022)
IR -нагрев	Чечевичная мука	Образцы подвергались обработке при влажности 25 % в течение 24, 48 и 96 часов, а затем нагревались инфракрасным излучением до температур поверхности 130°C и 150°C.	В частности, комбинированная обработка температурованием и инфракрасным нагревом существенно снизила твердость чечевичной муки	Liu et al (2020)
Микроволновая обработка	Арахисовая паста	Использовались разные мощности обработки 400, 800 и 1200 Вт) и время (4, 4,5, 5 и 5,5 мин).	Реологические свойства арахисовой пасты, предварительно обработанной микроволнами, были лучше по сравнению с промышленным образцом.	Degon et al (2021)

В ходе исследования установлено, что после RF-обработки вязкость нативного кукурузного крахмала значительно увеличилась, что указывает на то, что RF-нагревание увеличивает набухание гранул, что приводит к более быстрой клейстеризации и ретроградации крахмала, одновременно снижая стабильность крахмальной пасты. Кроме того, радиочастотная обработка оказала меньшее влияние на свойства клейстера из кукурузного крахмала, чем на скорость нагрева (Zhou et al., 2023). В гречке, подвергнутой 10-минутной радиочастотной обработке при температуре 100°C, образовывались многочисленные мелкие частицы, что позволяет предположить, что структура зерна стала менее компактной и ее легче разрушить. Радиочастотный нагрев усиливает испарение воды, создавая трещины между молекулами и вызывая структурные изменения. Однако Vicente et al. (2023) обнаружили, что мука, обработанная MW, агрегируется в большие кластеры. Эта разница могла быть вызвана плавлением крахмала во время высоко-

частотного нагревания (Xu et al., 2023). Недавнее исследование показало, что приготовленный рис становится более твердым и менее липким после длительного хранения из-за ферментативных и неферментативных реакций, которые ослабляют структуру клеточной стенки, позволяя образовывать высокобелковые области из-за большей устойчивости к поглощению воды; следовательно, выдержанный рис, приготовленный с меньшим количеством воды, имел более твердую текстуру (Chitsuthipakorn & Thanapornpoonpong, 2023). Текстурные характеристики сушеных пищевых продуктов влияют на их вкус. Хрусткость и твердость зерен арахиса, высушенных естественным путем, значительно выше, чем у зерен, обработанных другими методами сушки, такими как импульсно-вакуумная сушка. Микроструктурный анализ показал, что образцы арахиса, полученные после импульсного вакуума и естественной сушки, имеют плотную тканевую структуру практически без крупных пор, тогда как сушка горячим воздухом и радиоча-

стотная обработка в сочетании с обработкой горячим воздухом привели к образованию более крупных отверстий, что привело к менее твердому материалу и более хрустящей структуре арахиса. Натуральные, высушенные на солнце зерна арахиса и зерна арахиса, обработанные сочетанием радиочастотного излучения и горячего воздуха, демонстрируют одинаковую жевательную способность без существенных различий. Образцы арахиса, высушенные в импульсном вакууме, демонстрируют самую низкую жевательную способность, показывая, что RF в сочетании с сушкой горячим воздухом приводит к улучшению жевательной способности (Xie et al., 2022). Напротив, увеличение межэлектродного промежутка во время радиочастотной обработки образцов *Lentinus edodes* увеличило диффузию соли, но уменьшило движение воды, что привело к увеличению жесткости (Zhang et al., 2023). Более того, твердость образцов риса первоначально уменьшалась, но впоследствии увеличивалась. Радиочастотная обработка, вероятно, изменяла структуру молекул крахмала в образцах риса и снизила твердость зерна. Кроме того, с повышением температуры амилазная активность образца возрастала, что приводило к гидролизу амилопектина. Поскольку предпочтения потребителей в отношении сенсорного восприятия сушеных продуктов различаются, условия сушки можно регулировать в зависимости от желаемой текстуры.

### **Микроволновой нагрев (MW)**

MW — это неионизирующие электромагнитные лучи с частотой 915 или 2450 МГц, которые взаимодействуют с химическим составом пищевых продуктов и вызывают молекулярное трение, тем самым, приводя к мгновенному выделению тепла (Adebowale et al., 2020; Mahalaxmi et al., 2022). Увеличение мощности МВт сокращает продолжительность сушки и приводит к увеличению размера пор и более хрустящей текстуре зерен сладкой кукурузы (Castillo-Gironés et al., 2021). MW создают молекулярные вибрации, которые могут облегчать взаимодействие между белками и полисахаридами (Li, Wang, Liu и др., 2023). MW-сушка обычно повреждает текстуру пищевых продуктов из-за быстрой передачи массы и тепла. Это может повлиять на текстурные свойства, такие свойства при разжевывании, твердость и липкость (Kutlu et al., 2022; Süfer et al., 2018). Поскольку глютен и крахмал способствуют повышению прочности и твердости пищевых продуктов, обработка MW может улучшить продукты, влияя на клейковинный каркас и управляя свойствами крахмальных полисахаридов сетками клейковины, набуханием крахмальных гранул и MC (Zhou et al., 2021). Кроме того, быстрый перенос воды с поверхности продукта приводит к более низкой объемной плотности, низкой усадке и пористой структуре. Соответственно, продукты, высушенные MW, более

высокие пищевую ценность и органолептические показатели, а также структуру и текстуру, аналогичную жареным продуктам (Castillo-Gironés et al., 2021).

По сравнению с сушкой горячим воздухом, VW-сушка оказывает существенное влияние на упругость фасоли после варки. Жевательная способность, твердость и липкость сушеных бобов после варки были значительно снижены за счет сушки горячим воздухом MW. Это может быть связано с тем, что MW-излучение дестабилизирует кристаллическую структуру фасоли (Li et al., 2022). Недавнее исследование показало, что взаимодействие SPI и соевого масла во время сушки MW помогает снизить скорость связывания между молекулами белка и сформировать структуру композитного геля белок-масло, тем самым приводя к снижению твердости геля. Более того, снижение твердости геля улучшает глотательные свойства SPI (Li, Wang, Liu et al., 2023). Многие исследователи наблюдали увеличение твердости риса, созревшего как традиционным способом, так и ускоренно созревшего с помощью MW. Усиленная ретроградация крахмала при выдержке рисового зерна приводит к увеличению твердости вареного риса. Более того, увеличение количества связей SS в белках во время хранения может укрепить гранулы крахмала в зернах риса, увеличивая твердость риса. Модификации структуры белковых и крахмальных гелей (развитие плотной сети оризениновых гелей) также могут способствовать увеличению твердости приготовленного выдержанного риса. Более того, клейкость всего незрелого риса, высушенного методом MW, существенно увеличивается, что сохраняет более высокую плотность во время жевания (Bruce et al., 2022). Сообщается, что выделение амилозы во время кулинарной обработки приводит к образованию твердой структуры на поверхности образцов киноа во время ретроградации и охлаждения, тем самым увеличивая ее твердость. Кроме того, липкость киноа увеличивается с увеличением продолжительности обработки MW. Более высокая клейкость киноа связана не только с крахмалом, но также с содержанием белков и липидов. Во время термической обработки и термической обработки липиды и белки быстро образуют комплексы с крахмалом, выделяемым из образцов киноа, что приводит к увеличению клейкости и ухудшению качественных показателей. Приготовление привело к образованию пористой внутренней структуры сырого киноа, при этом сухое вещество выщелачивалось во время приготовления, что дополнительно влияло на липкость приготовленной киноа (Cao et al., 2022; Wu et al., 2017). Более того, проникновение воды в зерна киноа во время приготовления приводит к образованию больших полостей и расширению тканей киноа. По мере продолжения приготовления дальнейшее испарение воды приводит к образованию отверстий большего размера. Напротив, MW-обработка приводит к образованию плотных и более однородных пор и структур внутри зерен киноа, тем

самым способствуя образованию сетки гидратного геля крахмала. Эта плотная и твердая структура киноа также может способствовать ее повышенной твердости (рис. 4) (Cao et al., 2022). Также зерна кукурузы, высушенные с использованием вакуумно-MW технологии с короткой предварительной обработкой конвективной сушкой, демонстрируют меньшую когезию (Castillo-Gironés et al., 2021). В другом исследовании установили, что образцы, обработанные MW (20 % и 30 % MC), имели немного более крупные и более упакованные агрегаты, а также некоторую шероховатость на поверхности крахмальных гранул. Для образцов, обработанных MW (25 % MC), этот эффект усиливался, и на поверхности гранул появлялись глубокие отверстия и другие эксудаты, склеивающие гранулы крахмала. Эти эксудаты могут представлять собой амилозу, выделяемую из крахмальных гранул во время обработки MW (Vicente et al., 2023). Пропаренный коричневый рис имеет мягкую текстуру и лучшие характеристики при разжевывании, чем коричневый рис. С точки зрения микроструктуры, пропаривание и последующая MW-сушка выводят влагу наружу, образуя дополнительные воздушные пространства между крахмальными гранулами в пропаренном рисе. Эти внутренние воздушные зазоры увеличивают поглощение воды рисовыми зёрнами во время приготовления, в результате чего текстура пропаренного риса становится мягкой. Более того, MW-сушка снижает содержание амилозы, не влияя на уровень жира, белка или золы. Поскольку содержание амилозы положительно связано с твердостью риса, снижение содержания амилозы из-за сушки MW влечет за собой повышенную мягкость пропаренного риса (Huang et al., 2021).

### **Ограничения промышленного применения MW нагрева продовольственного зерна**

Образцы риса, обработанные MW, демонстрируют измененную вязкость, показывая, что увеличение обратной вязкости вызывает большую степень ретроградации и приводит к увеличению твердости приготовленного риса (Bruce et al., 2022). Во время MW-выпекания происходит быстрая передача тепла от внутренней части продукта к поверхности. Однако при низких температурах окружающей среды на поверхностях пищевых продуктов может происходить конденсация воды, ингибирующая реакцию Майяра и замедляющая образование корки, что приводит к нежелательным текстурным характеристикам (Chhanwal et al., 2019; De Pilli & Alessandrino, 2018). Негативные эффекты MW-обработки можно свести к минимуму, если подавать электроэнергию ступенчато, так что на начальной фазе сушки применяется более высокая мощность, за которой следует применение пониженной мощности, что приводит к получению продукта более высокого качества. Недостатком этого метода является то, что из-за распро-

странения волн в различных областях при MW-нагреве наблюдаются холодные и горячие точки. Кроме того, из-за небольших изменений сенсорных свойств, вызванных MW-обработкой цельного зерна, необходимо определить потребительскую приемлемость зерновых продуктов, высушенных MW. Что касается влияния MW-сушки на текстуру, быстрая массо- и теплопередача обычно ухудшает текстуру пищевых продуктов. Уровень мощности MW и длительность воздействия существенно влияют на белковые характеристики зерна. В частности, денатурация белка во время обработки MW обнажает гидрофобные и гидрофильные группы на поверхности, тем самым улучшая функциональные свойства и способствуя окончательному формированию вкуса и текстуры пищевых продуктов.

### **Инфракрасный нагрев (IR)**

Методика IR-нагрева предполагает минимизацию продолжительности воздействия электромагнитного излучения на продукты питания с использованием длин волн от 1,8 до 3,4 мкм (Ogundele & Kayitesi, 2019). Эта форма нагрева приводит к тому, что ядро сначала высыхает изнутри к внешней периферии посредством конвекции и излучения, обеспечивая более высокую скорость теплопередачи. IR-сушка сокращает время сушки, повышает энергоэффективность и уменьшает поток воздуха, необходимый для сушки, по сравнению с традиционной сушкой (Timm et al., 2020). Более того, ИК-нагрев может влиять на диссоциацию и ассоциацию биологических макромолекул, тем самым влияя на способность к расширению крахмала и белковую функцию зерен риса (Ding et al., 2023). Быстрый нагрев во время IR-сушки помогает сохранить органолептические показатели и пищевую ценность, в результате чего обезвоженный продукт получается более высокого качества по сравнению с традиционными методами сушки. Когезия и жевательная способность риса, обработанного IR, не так существенны, особенно в условиях хранения при 4 °C, из-за агрегации крахмало-белковых и крахмал-крахмальных частиц. Однако упругость образцов риса увеличивается после IR-обработки из-за распада молекул крахмала, что приводит к увеличению гидратационной способности и водопоглощения рисовых зерен (Ding et al., 2023). Кроме того, IR-нагревание вызывало небольшие морфологические изменения, включая углубления и комкование, в кондиционированном влагой крахмале вигны, тогда как существенные изменения отмечаются в гранулах кукурузного крахмала. Эти изменения в морфологии гранул, влияющие на сенсорные качества, можно объяснить разрыхлением кристаллических областей амилопектина во время нагревания и повторной ассоциацией цепей крахмала (Oyeyinka et al., 2021). Однако другое исследование показало, что после варки твердость рисовых зерен увеличивалась на 15,79 %

при изменении условий сушки со 100°C/15 мм (38,62 Н) на 130°C/15 мм (44,12 Н). Увеличение глубины слоя и температуры сушки привело к увеличению твердости, образованию белковых комплексов и потемнению вареного зерна, одновременно уменьшая выщелоченную амилозу из образцов риса. Более того, образование белковых комплексов уменьшает выщелачивание твердых веществ во время варки и увеличивает твердость приготовленного риса. Эти условия вызывают нежелательные изменения показателей помола и цвета с увеличением твердости ядра, что является ухудшением органолептических показателей (Timm et al., 2020). IR-обжарка снизила влажность и силу разрушения ядер арахиса, которые становились все более хрупкими и начинали быстрее крошиться. После обжарки арахис становится более хрустящим и менее жестким, что улучшает его текстурные свойства (Golani et al., 2023). После обжарки в дальнем IR-диапазоне на поверхности ячменя высокогорного не наблюдалось трещин, а на зернах ячменя не выявлено явного эффекта вспучивания. Влияние дальнего IR-облучения на набухание зерна зависит от исходной массы влаги (МС) образца. Образцы ячменя с 29,5 % МС, нагретые дальним ИК-светом, показали низкое набухание в поперечном сечении. При высокой МС текстура зерна будет слишком мягкой, что предотвратит резкий сброс давления пара из-за отсутствия барьера давления, что поможет уменьшить набухание (Dang et al., 2022). Текстура ухудшается по мере увеличения времени IR-нагрева вне зависимости от интенсивности нагрева. Аналогично, твердость снижается по мере увеличения продолжительности обработки. Более мягкая текстура достигается при нагревании эдамаме в течение 100 с при низкой и высокой интенсивности IR-нагрева. Твердость обусловлена изменениями пектина и крахмала при термической обработке; некоторые компоненты пектина становятся растворимыми, тем самым размягчая пищевой продукт. Кроме того, размягчение белкового матрикса бобов и разрушение средней пластинки способствуют снижению твердости бобов. Средняя и низкая интенсивность нагрева приводят к одинаковому снижению твердости. Однако при более высокой интенсивности нагрева эдамаме демонстрирует различное поведение из-за быстрого повышения внутренней температуры (Lara et al., 2019). После темперирования изменения когезивности при IR-сушке более очевидны, чем при сушке тепловым насосом, при этом IR-сушка дает наибольшее значение когезионности ( $d = 3$ ) и влияет на структуру крахмала в рисовом зерне. Кроме того, значения упругости и жевательной способности значительно изменились, особенно между незакаленными и закаленными образцами (Zhou et al., 2018). ИК-нагрев при 150 °C привел к более очевидному эффекту размягчения по сравнению с эффектом при 130 °C, что можно объяснить более высокой температурой, вызывающей большее фотодеградацию молекул крахмала в семенах чечевицы (Liu et al., 2020). Энергия сжатия, опреде-

ляемая как количество энергии, необходимой для сжатия образцов, изменилась с 258,08 до 550,08 Нс. Между энергией сжатия и мощностью IR-излучения существует обратная зависимость. При обжаривании ядер арахиса МС уменьшается, образцы становятся более мягкими и хрустящими, а энергия сжатия снижается. Мощность IR обжарки является основным фактором, влияющим на твердость; таким образом, влияние мощности IR-излучения более критично, чем влияние времени воздействия (Bagheri et al., 2019).

### **Ограничения и перспективы производственного использования IR- нагрева продовольственного зерна**

Условия сильной регидратации IR-излучения могут снижать качества зерен риса, увеличить время приготовления и отрицательно влиять на органолептические показатели. В исследовании Timm et al. сообщалось, что увеличение глубины слоя и температуры привело к усилению комплексообразования белка и твердости зерен (Timm et al., 2020). В пищевой промышленности применение методов IR-нагрева и темперирования продовольственного зерна может быть полезным там, где требуется лучшая усвояемость крахмала. Снижение качества и деградацию пищевых компонентов при длительном воздействии IR-излучения можно предотвратить путем периодического применения данного излучения. IR-энергия выделяет большие количества тепла, и более длительное воздействие может привести к ожогам. Так как глубина проникновения внутрь пищевых продуктов ограничена, длительное воздействие IR-излучения, не чувствительного к отражательным характеристикам покрытий, приводит к разрыву тканей. Кроме того, IR-обработка модифицирует вторичную структуру поверхностных белков зерна и изменяет многоуровневую структуру крахмала, тем самым влияя на текстуру и кулинарные свойства, а также способствует стабильности зерна при хранении. В дальнейших исследованиях необходимо изучать технологические параметры и условия хранения цельнозерновой муки, чтобы продлить срок ее хранения, причем исследования в этой области имеют особое значение для разработки цельнозерновых продуктов.

### **Основные направления будущих исследований**

Новые нетермические и термические методы обработки такие как ультразвук (Juodeikiene et al., 2020), холодная плазма (Ding et al., 2022), PEF (Qiu et al., 2021), RF (Oke & Baik, 2022), MW (Mahalaxmi et al., 2022) и IR (Dang et al., 2022) использовались многими исследователями пищевых продуктов для обработки всех типов продоволь-

ственного зерна (зерновых, бобовых и продуктов их переработки). Избыточная мощность ультразвука (500 и 600 Вт) снижает содержание резистентного крахмала, возможно, из-за повреждения кристаллической молекулярной структуры и сильного физического разрушения молекул крахмала (Zhang, Xiao et al., 2021). Увеличение продолжительности воздействия холодной плазмы приводит к увеличению нарушения контура зерновой оболочки, но при этом на поверхности зерновой оболочки не образуются видимые полосы и трещины. Это может быть связано с воздействием на структуру оболочки ядра активных веществ, образующихся в результате низкотемпературной плазменной обработки и окисления, что снижает плоскостность поверхности зерна и изменяет поверхность оболочки ядра (Liu et al., 2022). По сравнению с нативным крахмалом, крахмал, обработанный PEF, имеет более низкое содержание медленно перевариваемого резистентного крахмала (Zeng et al., 2016). Во время выпечки MW происходит быстрая передача тепла изнутри к поверхности продукта. Однако при низкой температуре окружающей среды на поверхности изделия может образовываться конденсат. Следовательно, реакция Майяра не может быть завершена, и образование корки замедляется, что приводит к нежелательным текстурным качествам (Chhanwal et al., 2019; De Pilli & Alessandrino, 2018). Твердость является одним из наиболее важных параметров вкуса вареного риса, и она отрицательно коррелирует со вкусовыми показателями качества (Liu et al., 2020). Результаты исследования показали, что радиочастотная обработка может изменить структуру крахмала в рисе при повышении температуры до 70 °C и повышении активности амилазы в зерне, что приводит к гидролизу амилопектина и увеличению твердости (Yang et al., 2018). В другом исследовании установлено, что текстура ухудшается с увеличением продолжительности IR-обработки, независимо от интенсивности нагрева (Lara et al., 2019). Вместе с тем каждая технология имеет ограничения, влияющие на ее эффективность и производительность. Поэтому влияние процессов на продукцию требует последовательных экспериментальных исследований, которые позволят получить фундаментальные знания и установить конкретные параметры обработки и воздействия. Комбинирование двух или более технологий, таких как вакуумная ультразвуковая обработка (Yang et al., 2021), RF-сушка горячим воздухом с перерывом (Mahmood et al., 2023) и вакуумная MW-сушка (Castillo-Gironés et al., 2021) можно использовать для решения вышеуказанных проблем. Более того, необходимы дальнейшие исследования термических и нетермических методов и их воздействия на структуру пищевых продуктов, чтобы определить весь потенциал этих новых технологий для производства новых продуктов питания с улучшенной индивидуальной текстурой и функциональностью. Оптимизация условий эксплуатации, конструктивных параметров и способов сочетания с другими

технологиями имеет важное значение для предотвращения производственных потерь, снижения выхода некачественного зерна, улучшения внешнего вида сушеной продукции. Большинство нетермических и термических технологий, разработанных для переработки продовольственного зерна в пищевой промышленности, все еще находятся на лабораторных или экспериментальных стадиях. Будущие исследования должны быть сосредоточены на масштабировании этих новых технологий до промышленного масштаба после достаточной валидации. Более того, несмотря на обширные исследования физико-химических свойств и физиологического воздействия зерна, исследования, направленные на изучение влияния методов обработки на сенсорные характеристики зерна, отсутствуют. Таким образом, необходимы дополнительные исследования, поскольку характеристики, предпочитаемые потребителями, такие как текстура, аромат, вкус и восприятие, играют важную роль в определении приемлемости продуктов питания, произведенных с использованием этих новых технологий. Эти факторы также определяют консолидацию методов обработки в цепочке поставок продуктов питания (Rocha et al., 2022).

## ВЫВОДЫ

Новые термические и нетермические способы обработки являются экологичной и эффективной альтернативой традиционной химической и термической обработке продовольственного зерна. Обзор результатов научных исследований показал, что помимо безопасности и качества пищевых продуктов, использование новых технологий в большинстве случаев положительно коррелирует с технологическими свойствами продовольственного зерна. Несколько этапов обработки пищевых продуктов способствуют изменению качества текстуры. Изменения химического состава и микроструктуры клеток тканей также вносят значительный вклад в изменение текстуры продовольственного зерна. Обработка ультразвуком разрушает внутренние водородные связи между молекулами белка, тем самым ослабляя их третичную и четвертичную структуры. Кроме того, обработка ультразвуком усиливает гидролиз крахмала и снижает его вязкость. Обработка импульсным электрическим полем может вызывать конфигурационные и молекулярные изменения в биомакромолекулах сырья. В результате радиочастотного нагрева увеличивается набухание гранул, что приводит к более легкой желатинизации и ретроградации крахмала, одновременно снижая стабильность крахмального теста. MW-нагревание приводит к образованию плотных и более однородных пор и структур внутри образца, тем самым способствуя образованию сетки гидратного геля крахмала. Несмотря на доступную информацию о механизмах новых технологий в области переработки

продовольственного зерна, дальнейшие исследования должны быть сосредоточены на их влиянии на текстуру и пищевую ценность продовольственного зерна. Это не только облегчит понимание влияния технологий обработки на структуру пищевых продуктов, но также будет способствовать принятию учеными и технологами пищевых производств возможных технологий для обработки продовольственного зерна.

## ВКЛАД АВТОРОВ

**Бурак Л.Ч:** концептуализация, методология, проведение исследования, ресурсы, создание рукописи и их редактирование, руководство исследованием, администрирование проекта.

**Сапач А.Н:** проведение исследования, верификация данных, формальный анализ, создание черновика рукописи, визуализация

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Adebowale, O. J., Taylor, J. R. N., & de Kock, H. L. (2020). Stabilization of wholegrain sorghum flour and consequent potential improvement of food product sensory quality by microwave treatment of the kernels. *LWT-Food Science and Technology*, 132, 109827. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2020.109827>
- Alpos, M., Leong, S. Y., Liesaputra, V., & Oey, I. (2022). Influence of pulsed electric fields (PEF) with calcium addition on the texture profile of cooked black beans (*Phaseolus vulgaris*) and their particle breakdown during in vivo oral processing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 75, 102892. <https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2021.102892>
- An, N. N., Sun, W. H., Li, B. Z., Wang, Y., Shang, N., Lv, W. Q., Li, D., & Wang, L. J. (2022). Effect of different drying techniques on drying kinetics, nutritional components, antioxidant capacity, physical properties and microstructure of edamame. *Food Chemistry*, 373, 131412. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2021.131412>
- Andreou, V., Sigala, A., Limnaios, A., Dimopoulos, G., & Taoukis, P. (2021). Effect of pulsed electric field treatment on the kinetics of rehydration, textural properties, and the extraction of intracellular compounds of dried chickpeas. *Journal of Food Science*, 86(6), 2539–2552. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15768>
- Areesirisuk, A., Wanlapa, A., Teeka, J., Kaewpa, D., & Chiu, C. H. (2023). Potential of infrared drying and cell-protective agent efficiency on survival of *Lactobacillus plantarum* probiotic in fermented soybean meal. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 53, 102843. <https://doi.org/10.1016/J.BCAB.2023.102843>
- Aslam, R., Alam, M. S., Kaur, J., Panayampadan, A. S., Dar, O. I., Kothakota, A., & Pandiselvam, R. (2022). Understanding the effects of ultrasound processing on texture and rheological properties of food. *Journal of Texture Studies*, 53(6), 775–799. <https://doi.org/10.1111/JTXS.12644>
- Aslam, R., Alam, M. S., Singh, S., & Kumar, S. (2021). Aqueous ozone sanitization of whole peeled onion: Process optimization and evaluation of keeping quality during refrigerated storage. *LWT-Food Science and Technology*, 151, 112183. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2021.112183>
- Astráin-Redín, L., Alexandre, M., Raso, J., Cebrián, G., & Álvarez, I. (2021). Direct contact ultrasound in food processing: Impact on food quality. *Frontiers in Nutrition*, 8, 633070. <https://doi.org/10.3389/FNUT.2021.633070>
- Bagheri, H., Kashaninejad, M., Ziaifar, A. M., & Aalami, M. (2019). Textural, color and sensory attributes of peanut kernels as affected by infrared roasting method. *Information Processing in Agriculture*, 6(2), 255–264. <https://doi.org/10.1016/J.INPA.2018.11.001>
- Bahrami, N., Bayliss, D., Chope, G., Penson, S., Pehinec, T., & Fisk, I. D. (2016). Cold plasma: A new technology to modify wheat flour functionality. *Food Chemistry*, 202, 247–253. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2016.01.113>
- Bai, T. G., Zhang, L., Qian, J. Y., Jiang, W., Wu, M., Rao, S. Q., Li, Q., Zhang, C., & Wu, C. (2021). Pulsed electric field pretreatment modifying digestion, texture, structure and flavor of rice. *LWT-Food Science and Technology*, 138, 110650. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2020.110650>
- Barbhuiya, R. I., Singha, P., & Singh, S. K. (2021). A comprehensive review on impact of non-thermal processing on the structural changes of food components. *Food Research International*, 149, 110647. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110647>
- Barman, D., & Dkhar, M. S. (2015). Amylolytic activity and its parametric optimization of an endophytic bacterium *Bacillus subtilis* with an ethno-medicinal origin. *Biologia*, 70(3), 283–293. <https://doi.org/10.1515/BIOLOG-2015-0047/METRICS>
- Bassey, E. J., Cheng, J. H., & Sun, D. W. (2022). Improving drying kinetics, physicochemical properties and bioactive compounds of red dragon fruit (*Hylocereus* species) by novel infrared drying. *Food Chemistry*, 375, 131886. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2021.131886>
- Boateng, I. D. (2022). Recent processing of fruits and vegetables using emerging thermal and non-thermal technologies. A critical review of their potentialities and limitations on bioactives,

- structure, and drying performance. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1–35. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2140121>
- Bonto, A. P., Tiozon, R. N., Sreenivasulu, N., & Camacho, D. H. (2021). Impact of ultrasonic treatment on rice starch and grain functional properties: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 71, 105383. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2020.105383>
- Bruce, R. M., Atungulu, G. G., Sadaka, S., & Mauromoustakos, A. (2022). Aging characteristics of rice dried using microwave at 915 MHz frequency. *Cereal Chemistry*, 99(6), 1218–1233. <https://doi.org/10.1002/CCHE.10584>
- Burak, L. Ch., & Sapach A.N. (2023) The influence of pre-treatment with a pulsed electric field on the drying process: Scoping review. *Storage and processing of Farm Products*, (2), 44–71. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.418>
- Cao, G., Chen, X., Hu, B., Yang, Z., Wang, M., Song, S., Wang, L., & Wen, C. (2023). Effect of ultrasound-assisted resting on the quality of surimi-wheat dough and noodles. *Ultrasonics Sonochemistry*, 94, 106322. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2023.106322>
- Cao, H., Sun, R., Liu, Y., Wang, X., Guan, X., Huang, K., & Zhang, Y. (2022). Appropriate microwave improved the texture properties of quinoa due to starch gelatinization from the destructed cyptomere structure. *Food Chemistry: X*, 14, 100347. <https://doi.org/10.1016/J.FOCHX.2022.100347>
- Carullo, D., Abera, B. D., Scognamiglio, M., Donsi, F., Ferrari, G., & Pataro, G. (2022). Application of pulsed electric fields and high-pressure homogenization in biorefinery cascade of *C. vulgaris* microalgae. *Foods*, 11(3), 471. <https://doi.org/10.3390/FOODS11030471>
- Castillo-Gironés, S., Masztalerz, K., Lech, K., Issa-Issa, H., Figiel, A., & Carbonell-Barrachina, A. A. (2021). Impact of osmotic dehydration and different drying methods on the texture and sensory characteristic of sweet corn kernels. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(4), e15383. <https://doi.org/10.1111/JFPP.15383>
- Chen, G., Dong, S., Zhao, S., Li, S., & Chen, Y. (2019). Improving functional properties of zein film via compositing with chitosan and cold plasma treatment. *Industrial Crops and Products*, 129, 318–326. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2018.11.072>
- Chen, Y., Zhang, Y., Jiang, L., Chen, G., Yu, J., Li, S., & Chen, Y. (2020). Moisture molecule migration and quality changes of fresh wet noodles dehydrated by cold plasma treatment. *Food Chemistry*, 328, 127053. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2020.127053>
- Chhanwal, N., Bhushette, P. R., & Anandharamakrishnan, C. (2019). Current perspectives on non-conventional heating ovens for baking process—A review. *Food and Bioprocess Technology*, 12(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/S11947-018-2198-Y/METRICS>
- Chitsuthipakorn, K., & Thanapornpoonpong, S. (2023). Verification of rice quality during storage after drying with hot air and radio frequency heating. *Food Chemistry: X*, 20, 100882. <https://doi.org/10.1016/J.FOCHX.2023.100882>
- Chung, H. J., Cho, D. W., Park, J. D., Kweon, D. K., & Lim, S. T. (2012). In vitro starch digestibility and pasting properties of germinated brown rice after hydrothermal treatments. *Journal of Cereal Science*, 56(2), 451–456. <https://doi.org/10.1016/J.JCS.2012.03.010>
- Di Rosa, D. A. R., Bressan, F., Leone, F., Falqui, L., & Chiofalo, V. (2019). Radio frequency heating on food of animal origin: A review. *European Food Research and Technology*, 245(9), 1787–1797. <https://doi.org/10.1007/S00217-019-03319-8/METRICS>
- Dang, B., Zhang, W. G., Zhang, J., Yang, X. J., & Xu, H. D. (2022). Effect of thermal treatment on the internal structure, physicochemical properties and storage stability of whole grain highland barley flour. *Foods*, 11(14), 2021. <https://doi.org/10.3390/FOODS11142021>
- Degon, J. G., Zheng, C., Elkhedir, A., Yang, B., Zhou, Q., & Li, W. (2021). Effect of microwave pre-treatment on physical quality, bioactive compounds, safety risk factor, and storage stability of peanut butter. *Oil Crop Science*, 6(3), 137–144. <https://doi.org/10.1016/J.OCSCI.2021.07.006>
- De Pilli, T., & Alessandrino, O. (2018). Effects of different cooking technologies on biopolymers modifications of cereal-based foods: Impact on nutritional and quality characteristics review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(4), 556–565. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1544884>
- Devraj, L., Natarajan, V., Vadakkeppulpara Ramachandran, S., Manicakam, L., & Sarvanan, S. (2020). Influence of microwave heating as accelerated aging on physicochemical, texture, pasting properties, and microstructure in brown rice of selected Indian rice varieties. *Journal of Texture Studies*, 51(4), 663–679. <https://doi.org/10.1111/JTXS.12522>
- Ding, C., Chang, L., Luo, Y., Tao, T., Atungulu, G. G., Ding, H., Huang, L., Simelane, M. B., Zhao, S., & Liu, Q. (2023). Influence of cooking and texture attributes of far infrared radiated Japonica rice during storage. *Journal of Cereal Science*, 112, 103710. <https://doi.org/10.1016/J.JCS.2023.103710>
- Ding, J., Hou, G. G., Dong, M., Xiong, S., Zhao, S., & Feng, H. (2018). Physicochemical properties of germinated dehulled rice flour and energy requirement in germination as affected by ultrasound treatment. *Ultrasonics Sonochemistry*, 41, 484–491. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2017.10.010>
- Ding, T., Cullen, P. J., & Yan, W. (2022). Applications of cold plasma in food safety. In *Applications of cold plasma in food safety*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-1827-7/COVER>
- Duque, S. M. M., Leong, S. Y., Agyei, D., Singh, J., Larsen, N., Sutton, K., & Oey, I. (2022). Understanding the mechanism of how pulsed electric fields treatment affects the digestibility and characteristics of starch in oat flour. *Applied Sciences*, 12(20), 10293. <https://doi.org/10.3390/APP122010293>

- Flores-Silva, P. C., Roldan-Cruz, C. A., Chavez-Esquivel, G., Vernon-Carter, E. J., Bello-Perez, L. A., & Alvarez-Ramirez, J. (2017). In vitro digestibility of ultrasound-treated corn starch. *Starch-Stärke*, 69(9–10), 1700040. <https://doi.org/10.1002/STAR.201700040>
- Gao, J., Wu, M., Du, S., Zhang, H., Wang, S., & Ling, B. (2023). Recent advances in food processing by radio frequency heating techniques: A review of equipment aspects. *Journal of Food Engineering*, 357, 111609. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2023.111609>
- Gebremical, G. G., Emire, S. A., & Berhanu, T. (2019). Effects of multihollow surface dielectric barrier discharge plasma on chemical and antioxidant properties of peanut. *Journal of Food Quality*, 2019, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2019/3702649>
- Geng, D. H., Lin, Z., Liu, L., Qin, W., Wang, A., Wang, F., & Tong, L. T. (2021). Effects of ultrasound-assisted cellulase enzymatic treatment on the textural properties and in vitro starch digestibility of brown rice noodles. *LWT-Food Science and Technology*, 146, 111543. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2021.111543>
- Golani, R., Leishangthem, C., Xiao, H., Zhang, Q., & Sutar, P. P. (2023). Effect of high temperature short time infrared roasting of peanuts. *Journal of Future Foods*, 4(2), 173–178. <https://doi.org/10.1016/J.JFUTFO.2023.06.009>
- Gong, X., Chen, Z., Hu, J. J., & Liu, C. (2022). Advances of electroporation-related therapies and the synergy with immunotherapy in cancer treatment. *Vaccines*, 10(11), 1942. <https://doi.org/10.3390/VACCINES10111942>
- Guiyun, C., Yushan, W., Mingyue, Z., Wanxing, M., Xixian, X., & Ye, C. (2022). Cold atmospheric plasma treatment improves the  $\gamma$ -aminobutyric acid content of buckwheat seeds providing a new anti-hypertensive functional ingredient. *Food Chemistry*, 388, 133064. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2022.133064>
- Hassan, A. B., von Hoersten, D., & Mohamed Ahmed, I. A. (2019). Effect of radio frequency heat treatment on protein profile and functional properties of maize grain. *Food Chemistry*, 271, 142–147. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2018.07.190>
- Homayoonfal, M., & Malekjani, N. (2023). Drying of cereal grains and beans. In *Drying technology in food processing* (pp. 459–489). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819895-7.00009-2>
- Hong, J., An, D., Liu, C., Li, L., Han, Z., Guan, E., Xu, B., Zheng, X., & Bian, K. (2020). Rheological, textural, and digestible properties of fresh noodles: Influence of starch esterified by conventional and pulsed electric field-assisted dual technique with full range of amylose content. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(8), e14567. <https://doi.org/10.1111/JFPP.14567>
- Huang, W., Song, E., Lee, D., Seo, S., Lee, J., Jeong, J., Chang, Y. H., Lee, Y. M., & Hwang, J. (2021). Characteristics of functional brown rice prepared by parboiling and microwave drying. *Journal of Stored Products Research*, 92, 101796. <https://doi.org/10.1016/J.JSPR.2021.101796>
- International Grain Council (IGC). (2023). <https://www.igc.int/en/default.aspx>
- Jarén, C., López, A., & Arazuri, S. (2016). Advanced analytical techniques for quality evaluation of potato and its products. In *Advances in potato chemistry and technology* (pp. 563–602). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800002-1.00019-4>
- Ji, W., Li, M., Yang, T., Li, H., Li, W., Wang, J., & Ma, M. (2022). Effect of cold plasma on physical–biochemical properties and nutritional components of soybean sprouts. *Food Research International*, 161, 111766. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2022.111766>
- Ji, X., Xiong, Y. L., & Jiang, J. (2023). Tunable rice protein–starch composite soft gels: Structural role of ultrasound-modified protein. *Food Hydrocolloids*, 148, 109462. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2023.109462>
- Jiao, Y., Tang, J., Wang, Y., & Koral, T. L. (2018). Radio-frequency applications for food processing and safety. *Annual Review of Food Science and Technology*, 9, 105–127. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV-FOOD-041715-033038>
- Jimoh, K. A., Hashim, N., Shamsudin, R., Man, H. C., Jahari, M., & Onwude, D. I. (2023). Recent advances in the drying process of grains. *Food Engineering Reviews*, 15(3), 548–576. <https://doi.org/10.1007/S12393-023-09333-7/FIGURES/1>
- Juodeikiene, G., Zadeike, D., Trakselyte-Rupsiene, K., Gasauskaite, K., Bartkiene, E., Lele, V., Viskelis, P., Bernatoniene, J., Ivanauskas, L., & Jakstas, V. (2020). Functionalisation of flaxseed proteins assisted by ultrasonication to produce coatings enriched with raspberries phytochemicals. *LWT-Food Science and Technology*, 124, 109180. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2020.109180>
- Kariman, M., Tabarsa, F., Zamani, S., Kashi, P. A., & Torshizi, M. V. (2019). Classification of the energy and exergy of microwave dryers in drying kiwi using artificial neural networks. *Carpathian Journal of Food Science and Technology*, 11(2), 29–45.
- Kong, X. (2019). Starches modified by nonconventional techniques and food applications. In *Starches for food application: Chemical, technological and health properties* (pp. 271–295). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809440-2.00007-1>
- Kutlu, N., Pandiselvam, R., Saka, I., Kamiloglu, A., Sahni, P., & Kothakota, A. (2022). Impact of different microwave treatments on food texture. *Journal of Texture Studies*, 53(6), 709–736. <https://doi.org/10.1111/JTXS.12635>
- Lara, L. M., Wilson, S. A., Chen, P., & Atungulu, G. G. (2019). The effects of infrared treatment on physicochemical characteristics of vegetable soybean. *Heliyon*, 5(1), e01148. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2019.E01148>
- Lee, C. M., & Resurreccion, A. V. A. (2006). Predicting sensory attribute intensities and consumer acceptance of stored

- roasted peanuts using instrumental measurements. *Journal of Food Quality*, 29(4), 319–338. <https://doi.org/10.1111/J.1745-4557.2006.00076.X>
- Li, A., Guo, Z., Wang, Z., Yang, Q., Wen, L., Xiang, X., & Kan, J. (2023). Effect of multiple-frequency ultrasound-assisted transglutaminase dual modification on the structural, functional characteristics and application of Qingke protein. *Ultrasonics Sonochemistry*, 94, 106317. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2023.106317>
- Li, M., Wang, B., Lv, W., Lin, R., & Zhao, D. (2022). Characterization of pre-gelatinized kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.) produced using microwave hot-air flow rolling drying technique. *LWT-Food Science and Technology*, 154, 112673. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2021.112673>
- Li, Q., Wu, Q. Y., Jiang, W., Qian, J. Y., Zhang, L., Wu, M., Rao, S. Q., & Wu, C. S. (2019). Effect of pulsed electric field on structural properties and digestibility of starches with different crystalline type in solid state. *Carbohydrate Polymers*, 207, 362–370. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2018.12.001>
- Li, Y., Wang, J. H., Han, Y., Yue, F. H., Zeng, X. A., Chen, B. R., Zeng, M. Q., Woo, M. W., & Han, Z. (2023). The effects of pulsed electric fields treatment on the structure and physicochemical properties of dialdehyde starch. *Food Chemistry*, 408, 135231. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2022.135231>
- Li, Y., Wang, S., Liu, X., Zhao, G., Yang, L., Zhu, L., & Liu, H. (2023). Improvement in texture and color of soy protein isolate gel containing capsorubin and carotenoid emulsions following microwave heating. *Food Chemistry*, 428, 136743.
- Li, Y., Zhang, Y., Liu, X., Wang, H., & Zhang, H. (2019). Effect of ultrasound-assisted freezing on the textural characteristics of dough and the structural characterization of wheat gluten. *Journal of Food Science and Technology*, 56(7), 3380–3390. <https://doi.org/10.1007/S13197-019-03822-6/METRICS>
- Lian, F., Sun, D. W., Cheng, J. H., & Ma, J. (2022). Improving modification of structures and functionalities of food macromolecules by novel thermal technologies. *Trends in Food Science & Technology*, 129, 327–338. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2022.10.001>
- Liang, Y., Teng, F., He, M., Jiang, L., Yu, J., Wang, X., Li, Y., & Wang, Z. (2021). Effects of ultrasonic treatment on the structure and rehydration peculiarity of freeze-dried soy protein isolate gel. *Food Structure*, 28, 100169. <https://doi.org/10.1016/J.FOOSTR.2020.100169>
- Ling, B., Cheng, T., & Wang, S. (2020). Recent developments in applications of radio frequency heating for improving safety and quality of food grains and their products: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(15), 2622–2642. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1651690>
- Liu, J., Wang, R., Chen, Z., & Li, X. (2021). Effect of cold plasma treatment on cooking, thermomechanical and surface structural properties of Chinese milled rice. *Food and Bioprocess Technology*, 14(5), 866–886. <https://doi.org/10.1007/S11947-021-02614-1/METRICS>
- Liu, S., He, T., Rafique, H., Zou, L., & Hu, X. (2022). Effect of low-temperature plasma treatment on the microbial inactivation and physicochemical properties of the oat grain. *Cereal Chemistry*, 99(6), 1373–1382. <https://doi.org/10.1002/CICHE.10599>
- Liu, S., Yin, H., Pickard, M., & Ai, Y. (2020). Influence of infrared heating on the functional properties of processed lentil flours: A study focusing on tempering period and seed size. *Food Research International*, 136, 109568. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2020.109568>
- Luo, X. E., Wang, R. Y., Wang, J. H., Li, Y., Luo, H. N., Zeng, X. A., Woo, M. W., & Han, Z. (2023). Combining pulsed electric field and cross-linking to enhance the structural and physicochemical properties of corn porous starch. *Food Chemistry*, 418, 135971. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2023.135971>
- Mahalaxmi, S., Himashree, P., Malini, B., & Sunil, C. K. (2022). Effect of microwave treatment on the structural and functional properties of proteins in lentil flour. *Food Chemistry Advances*, 1, 100147. <https://doi.org/10.1016/J.FOCHA.2022.100147>
- Mahendran, R., Kavitha Abirami, C. V., & Alagusundaram, K. (2017). Cold plasma technology: An emerging non-thermal processing of foods—A review. In *Engineering interventions in agricultural processing* (pp. 33–55). Apple Academic Press. <https://doi.org/10.1201/9781315207377-2>
- Mahmood, N., Liu, Y., Munir, Z., Zhang, Y., & Niazi, B. M. K. (2022). Effects of hot air assisted radio frequency drying on heating uniformity, drying characteristics and quality of paddy. *LWT-Food Science and Technology*, 158, 113131. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2022.113131>
- Mahmood, N., Liu, Y., Saleemi, M. A., Munir, Z., Zhang, Y., & Saeed, R. (2023). Investigation of physicochemical and textural properties of brown rice by hot air assisted radio frequency drying. *Food and Bioprocess Technology*, 16(7), 1555–1569. <https://doi.org/10.1007/S11947-023-03001-8/METRICS>
- Mazi, B. G., Yildiz, D., & Barutçu Mazi, I. (2023). Influence of different soaking and drying treatments on anti-nutritional composition and technological characteristics of red and green lentil (*Lens culinaris* Medik.) flour. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 17(4), 3625–3643. <https://doi.org/10.1007/S11694-023-01906-8>
- Meurer, M. C., de Souza, D., & Ferreira Marczak, L. D. (2020). Effects of ultrasound on technological properties of chickpea cooking water (aquafaba). *Journal of Food Engineering*, 265, 109688. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2019.109688>
- Miano, A. C., Ibarz, A., & Augusto, P. E. D. (2016). Mechanisms for improving mass transfer in food with ultrasound technology: Describing the phenomena in two model cases. *Ultrasonics Sonochemistry*, 29, 413–419. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2015.10.020>

- Miano, A. C., Ibarz, A., & Augusto, P. E. D. (2017). Ultrasound technology enhances the hydration of corn kernels without affecting their starch properties. *Journal of Food Engineering*, 197, 34–43. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2016.10.024>
- Munekata, P. E. S., Domínguez, R., Pateiro, M., & Lorenzo, J. M. (2020). Influence of plasma treatment on the polyphenols of food products—A review. *Foods*, 9(7), 929. <https://doi.org/10.3390/FOODS9070929>
- Nath, K. G., Pandiselvam, R., & Sunil, C. K. (2023). High-pressure processing: Effect on textural properties of food – A review. *Journal of Food Engineering*, 351, 111521. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2023.111521>
- Nwachukwu, I. D., & Aluko, R. E. (2021). CHAPTER 1: Food Protein Structures, Functionality and Product Development. In C. C. Udenigwe (Ed.), *Nutritional Signaling Pathway Activities in Obesity and Diabetes* (27 ed., pp. 1–33). (Food Chemistry, Function and Analysis; Vol. 2021-January, No. 27). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/9781839163425-00001>
- Oey, I., Duvetter, T., Sila, D. N., Van Eylen, D., Van Loey, A., & Hendrickx, M. (2008). High pressure processing to optimise the quality of in-pack processed fruit and vegetables. In *In-pack processed foods: Improving quality* (pp. 338–357). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9781845694692.4.338>
- Ogundele, O. M., & Kayitesi, E. (2019). Influence of infrared heating processing technology on the cooking characteristics and functionality of African legumes: A review. *Journal of Food Science and Technology*, 56(4), 1669. <https://doi.org/10.1007/S13197-019-03661-5>
- Oke, A. B., & Baik, O. D. (2022). Role of moisture content, temperature, and frequency on dielectric behaviour of red lentil and Kabuli chickpea in relation to radio frequency heating. *Applied Food Research*, 2(1), 100046. <https://doi.org/10.1016/J.AFRES.2022.100046>
- Oyeyinka, S. A., Oyedeji, A. B., Ogundele, O. M., Adebo, O. A., Njobeh, P. B., & Kayitesi, E. (2021). Infrared heating under optimized conditions enhanced the pasting and swelling behaviour of cowpea starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, 184, 678–688. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2021.06.129>
- Pan, C., Ishizaki, S., Nagashima, Y., & Watabe, S. (2019). Functional and structural properties of red color-related pigment-binding protein from the shell of *Litopenaeus vannamei*. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(4), 1719–1727. <https://doi.org/10.1002/JSFA.9361>
- Pandiselvam, R., Kothakota, A., & Manikantan, M. R. (2022). Food processing and implications to the textural, structural, and rheological characteristics of food. *Journal of Texture Studies*, 53(6), 707–708. <https://doi.org/10.1111/JTXS.12732>
- Pandiselvam, R., Singh, A., Agriopoulou, S., Sachadyn-Król, M., Aslam, R., Gonçalves Lima, C. M., Khanashyam, A. C., Kothakota, A., Atakan, O., Kumar, M., Mathanghi, S. K., & Mousavi Khaenegah, A. (2022). A comprehensive review of impacts of ozone treatment on textural properties in different food products. *Trends in Food Science & Technology*, 127, 74–86. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2022.06.008>
- Pandiselvam, R., Tak, Y., Olum, E., Sujayasree, O. J., Tekgül, Y., Çalışkan Koç, G., Kaur, M., Nayi, P., Kothakota, A., & Kumar, M. (2022). Advanced osmotic dehydration techniques combined with emerging drying methods for sustainable food production: Impact on bioactive components, texture, color, and sensory properties of food. *Journal of Texture Studies*, 53(6), 737–762. <https://doi.org/10.1111/JTXS.12643>
- Paramita, V. D., Panyoyai, N., & Kasapis, S. (2020). Molecular functionality of plant proteins from low- to high-solid systems with ligand and co-solute. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(7), 2550. <https://doi.org/10.3390/IJMS21072550>
- Pu, H., Wei, J., Wang, L., Huang, J., Chen, X., Luo, C., Liu, S., & Zhang, H. (2017). Effects of potato/wheat flours ratio on mixing properties of dough and quality of noodles. *Journal of Cereal Science*, 76, 236–242. <https://doi.org/10.1016/J.JCS.2017.06.020>
- Qiu, S., Abbaspourrad, A., & Padilla-Zakour, O. I. (2021). Changes in the glutinous rice grain and physicochemical properties of its starch upon moderate treatment with pulsed electric field. *Foods*, 10(2), 395. <https://doi.org/10.3390/FOODS10020395>
- Rahman, M. M., & Lamsal, B. P. (2023). Effects of atmospheric cold plasma and high-power sonication on rheological and gelling properties of mung bean protein dispersions. *Food Research International*, 163, 112265. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2022.112265>
- Rocha, C. S., Magnani, M., de Paiva Anciens Ramos, G. L., Bezerril, F. F., Freitas, M. Q., Cruz, A. G., & Pimentel, T. C. (2022). Emerging technologies in food processing: Impacts on sensory characteristics and consumer perception. *Current Opinion in Food Science*, 47, 100892. <https://doi.org/10.1016/J.COFS.2022.100892>
- Roknul, A. S. M., Zhang, M., Mujumdar, A. S., & Wang, Y. (2014). A comparative study of four drying methods on drying time and quality characteristics of stem lettuce slices (*Lactuca sativa* L.). *Drying Technology*, 32(6), 657–666. <https://doi.org/10.1080/07373937.2013.850435>
- Sakare, P., Prasad, N., Thombare, N., Singh, R., & Sharma, S. C. (2020). Infrared drying of food materials: Recent advances. *Food Engineering Reviews*, 12(3), 381–398. <https://doi.org/10.1007/S12393-020-09237-W/METRICS>
- Sakudo, A., Yagyu, Y., & Onodera, T. (2019). Disinfection and sterilization using plasma technology: Fundamentals and future perspectives for biological applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(20), 5216. <https://doi.org/10.3390/IJMS20205216>
- Sarangapani, C., Yamuna Devi, R., Thirumdas, R., Trimukhe, A. M., Deshmukh, R. R., & Annapure, U. S. (2017). Physico-chemical properties of low-pressure plasma treated black gram. *LWT—*

- Food Science and Technology*, 79, 102–110. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2017.01.017>
- Shams, R., Manzoor, S., Shabir, I., Dar, A. H., Dash, K. K., Srivastava, S., Pandey, V. K., Bashir, I., & Khan, S. A. (2023). Pulsed electric field-induced modification of proteins: A comprehensive review. *Food and Bioprocess Technology*, 2023, 1–33. <https://doi.org/10.1007/S11947-023-03117-X>
- Shanker, M. A., Khanashyam, A. C., Pandiselvam, R., Joshi, T. J., Thomas, P. E., Zhang, Y., Rustagi, S., Bharti, S., Thirumdas, R., Kumar, M., & Kothakota, A. (2023). Implications of cold plasma and plasma activated water on food texture—A review. *Food Control*, 151, 109793. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCONT.2023.109793>
- Shen, L., Zhu, Y., Wang, L., Liu, C., Liu, C., & Zheng, X. (2019). Improvement of cooking quality of germinated brown rice attributed to the fissures caused by microwave drying. *Journal of Food Science and Technology*, 56(5), 2737–2749. <https://doi.org/10.1007/S13197-019-03765-Y>
- Sridhar, K., Bouhallab, S., Croguennec, T., Renard, D., & Lechevalier, V. (2022). Application of high-pressure and ultrasound technologies for legume proteins as wall material in microencapsulation: New insights and advances. *Trends in Food Science & Technology*, 127, 49–62. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2022.07.006>
- Süfer, Ö., Demir, H., & Sezer, S. (2018). Convective and microwave drying of onion slices regarding texture attributes. *Czech Journal of Food Sciences*, 36(2), 187–193. <https://doi.org/10.17221/310/2017-CJFS>
- Thirumdas, R., Saragapani, C., Ajinkya, M. T., Deshmukh, R. R., & Annature, U. S. (2016). Influence of low pressure cold plasma on cooking and textural properties of brown rice. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 37, 53–60. <https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2016.08.009>
- Timm, N. d. S., Lang, G. H., Ferreira, C. D., Pohndorf, R. S., & de Oliveira, M. (2020). Infrared radiation drying of parboiled rice: Influence of temperature and grain bed depth in quality aspects. *Journal of Food Process Engineering*, 43(4), e13375. <https://doi.org/10.1111/JFPE.13375>
- Trung, P. T. B., Ngoc, L. B. B., Hoa, P. N., Tien, N. N. T., & Hung, P. V. (2017). Impact of heat-moisture and annealing treatments on physicochemical properties and digestibility of starches from different colored sweet potato varieties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 105, 1071–1078. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2017.07.131>
- Vicente, A., Villanueva, M., Caballero, P. A., Muñoz, J. M., & Ronda, F. (2023). Buckwheat grains treated with microwave radiation: Impact on the techno-functional, thermal, structural, and rheological properties of flour. *Food Hydrocolloids*, 137, 108328. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2022.108328>
- Wang, M. S., Wang, L. H., Bekhit, A. E. D. A., Yang, J., Hou, Z. P., Wang, Y. Z., Dai, Q. Z., & Zeng, X. A. (2018). A review of sub-lethal effects of pulsed electric field on cells in food processing. *Journal of Food Engineering*, 223, 32–41. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2017.11.035>
- Wu, G., Morris, C. F., & Murphy, K. M. (2017). Quinoa starch characteristics and their correlations with the texture profile analysis (TPA) of cooked quinoa. *Journal of Food Science*, 82(10), 2387–2395. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13848>
- Xie, Y., Lin, Y., Li, X., Yang, H., Han, J., Shang, C., Li, A., Xiao, H., & Lu, F. (2022). Peanut drying: Effects of various drying methods on drying kinetic models, physicochemical properties, germination characteristics, and microstructure. *Information Processing in Agriculture*, 10(4), 447–458. <https://doi.org/10.1016/J.INPA.2022.04.004>
- Xu, J., Yang, G., Zhou, D., Fan, L., Xu, Y., Guan, X., Li, R., & Wang, S. (2023). Effect of radio frequency energy on buckwheat quality: An insight into structure and physicochemical properties of protein and starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, 251, 126428. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2023.126428>
- Yang, C., Zhao, Y., Tang, Y., Yang, R., Yan, W., & Zhao, W. (2018). Radio frequency heating as a disinfection method against *Corcyra cephalonica* and its effect on properties of milled rice. *Journal of Stored Products Research*, 77, 112–121. <https://doi.org/10.1016/J.JSPR.2018.04.004>
- Yang, Y., Zhou, Y., Lyu, Y., Shao, B., & Xu, Y. (2023). High-throughput multitarget quantitative assay to profile the whole grain-specific phytochemicals alkylresorcinols, benzoxazinoids and avenanthramides in whole grain and grain-based foods. *Food Chemistry*, 426, 136663. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2023.136663>
- Yang, Z. H., Zhou, H. M., & Bai, Y. P. (2021). Effects of vacuum ultrasonic treatment on the texture of vegetarian meatloaves made from textured wheat protein. *Food Chemistry*, 361, 130058. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2021.130058>
- Zambelli, R. A., Galvão, A. M. M. T., de Mendonça, L. G., Leão, M. V. d. S., Carneiro, S. V., Lima, A. C. S., & Melo, C. A. L. (2018). Effect of different levels of acetic, citric and lactic acid in the cassava starch modification on physical, rheological, thermal and microstructural properties. *Food Science and Technology Research*, 24(4), 747–754.
- Zeng, F., Gao, Q. Y., Han, Z., Zeng, X. A., & Yu, S. J. (2016). Structural properties and digestibility of pulsed electric field treated waxy rice starch. *Food Chemistry*, 194, 1313–1319. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2015.08.104>
- Zhang, B., Tan, C., Zou, F., Sun, Y., Shang, N., & Wu, W. (2022). Impacts of cold plasma technology on sensory, nutritional and safety quality of food: A review. *Foods*, 11(18), 2818. <https://doi.org/10.3390/FOODS11182818>
- Zhang, B., Xiao, Y., Wu, X., Luo, F., Lin, Q., & Ding, Y. (2021). Changes in structural, digestive, and rheological properties of corn, potato, and pea starches as influenced by different ultrasonic

- treatments. *International Journal of Biological Macromolecules*, 185, 206–218. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2021.06.127>
- Zhang, C., Lyu, X., Arshad, R. N., Aadil, R. M., Tong, Y., Zhao, W., & Yang, R. (2023). Pulsed electric field as a promising technology for solid foods processing: A review. *Food Chemistry*, 403, 134367. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2022.134367>
- Zhang, L., Hu, Y., Wang, X., Abiola Fakayode, O., Ma, H., Zhou, C., Xia, A., & Li, Q. (2021). Improving soaking efficiency of soybeans through sweeping frequency ultrasound assisted by parameters optimization. *Ultrasonics Sonochemistry*, 79, 105794. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2021.105794>
- Zhang, S., Guan, E., Bian, k., Xu, M., & Zhang, K. (2015). Digestibility of starch and protein during accelerated aging of wheat. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 30(2), 11–14.
- Zhang, Z., Zhang, M., & Zhao, W. (2023). Effect of starch-protein interaction on regulating the digestibility of waxy rice starch under radio frequency treatment with added CaCl<sub>2</sub>. *International Journal of Biological Macromolecules*, 232, 123236. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2023.123236>
- Zhou, D., Yang, G., Tian, Y., Kang, J., & Wang, S. (2023). Different effects of radio frequency and heat block treatments on multi-scale structure and pasting properties of maize, potato, and pea starches. *Food Hydrocolloids*, 136, 108306. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2022.108306>
- Zhou, J., Yan, B., Wu, Y., Zhu, H., Lian, H., Zhao, J., Zhang, H., Chen, W., & Fan, D. (2021). Effects of sourdough addition on the textural and physiochemical attributes of microwaved steamed-cake. *LWT- Food Science and Technology*, 146, 111396. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2021.111396>
- Zhou, X., Liu, L., Fu, P., Lyu, F., Zhang, J., Gu, S., & Ding, Y. (2018). Effects of infrared radiation drying and heat pump drying combined with tempering on the quality of long-grain paddy rice. *International Journal of Food Science and Technology*, 53(11), 2448–2456. <https://doi.org/10.1111/IJFS.13834>