

СОВРЕМЕННЫЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СТЕРИЛИЗАЦИИ МЯСНЫХ ПРОДУКТОВ. ОБЗОР

Бурак Л. Ч.

<https://orcid.org/0000-0002-6613-439X>

*доктор философии в области пищевых наук (PhD), к.т. н.,
директор ООО «БЕЛПРОСАКВА», Республика Беларусь, г. Минск.*

Егорова З. Е.

<https://orcid.org/0000-0001-8015-527X>

Белорусский государственный технологический университет, доцент, факультет технологии органических веществ, к.т.н.

MODERN ALTERNATIVE TECHNOLOGIES FOR STERILIZATION OF MEAT PRODUCTS. REVIEW

Burak L.

<https://orcid.org/0000-0002-6613-439X>

*Doctor of Philosophy in Food Sciences (PhD), c. t. s.,
director of BELROSAKVA LLC, Republic of Belarus, Minsk*

Yegorova Z.

<https://orcid.org/0000-0001-8015-527X>

Belarusian State Technological University, Associate Professor, Faculty of Technology of Organic Substances, Ph.D.

АННОТАЦИЯ

На всех этапах обработки мяса, его транспортировки и хранения существуют риски микробного загрязнения и порчи. Во всем мире в мясной промышленности широко используются традиционные методы термической обработки. Хотя эти методы обеспечивают микробиологическую безопасность, они также могут влиять на органолептические и функциональные свойства мясных продуктов. Цель исследования - обзор современных технологий нетермической обработки и их потенциального использования в качестве альтернативы традиционным методам обработки мяса и мясных продуктов. В обзор включены статьи, опубликованные на английском и русском языке за 2015–2024 годы. Поиск научной литературы по данной теме проводили по ключевым словам в библиографических базах Scopus, Web of science, PubMed и Google Scholar. В результате анализа результатов научных исследований представлены различные технологии, которые показали свою эффективность в процессе обработки мясных продуктов. В ходе обзора обобщены механизмы, преимущества и ограничения нетермических технологий за последние годы, а также обсуждены проблемы и перспективы, которые они представляют. Нетермические способы обработки показали значительные преимущества по сравнению с термическими процессами из-за меньшего времени обработки, использования низких температур и сниженного энергопотребления, а также улучшения качественных показателей пищевых продуктов, включающих цвет, вкус и пищевую ценность при одновременном увеличении функциональности. Технологии нетермической обработки демонстрирует значительный потенциал в качестве эффективного способа переработки мяса. Вместе с тем существуют значительные ограничения для промышленного внедрения альтернативных нетермических способов обработки мясных продуктов, так как нет фундаментальных исследований и подтверждений безопасности обработанных продуктов, не разработаны утвержденные нормативы обработки и стерилизации, а также ограниченные исследования на предмет загрязнения окружающей среды в процессе обработки.

ABSTRACT

At all stages of meat processing, transportation and storage, there are risks of microbial contamination and spoilage. Worldwide, traditional heat treatment methods are widely used in the meat industry. Although these methods provide microbiological safety, they can also affect the organoleptic and functional properties of meat products. The aim of the study is to review modern non-thermal processing technologies and their potential use as an alternative to traditional methods of processing meat and meat products. The review includes articles published in English and Russian in 2015–2024. The search for scientific literature on this topic was carried out using keywords in the bibliographic databases Scopus, Web of science, PubMed and Google Scholar. As a result of the analysis of the results of scientific research, various technologies are presented that have proven their effectiveness in the process of processing meat products. The review summarizes the mechanisms, advantages and limitations of non-thermal technologies in recent years and discusses the problems and prospects they represent. Non-thermal processing methods have shown significant advantages over thermal processes due to shorter processing times, use of low temperatures and reduced energy consumption, as well as improved food quality indicators including color, flavor and nutritional value while increasing functionality. Non-thermal processing technologies show significant potential as an effective method for meat processing. However, there are significant limitations to the

industrial implementation of alternative non-thermal processing methods for meat products, as there is a lack of fundamental research and evidence of the safety of processed products, no approved standards for processing and sterilization have been developed, and there is limited research on environmental pollution during processing.

Ключевые слова: мясо, инактивация, термическая обработка, нетермическая технология, стерилизация высоким давлением, технология сверхкритического диоксида углерода, электролитическая вода, ультразвук, импульсное электрическое поле.

Keywords: meat, inactivation, heat treatment, non-thermal technology, high pressure sterilization, supercritical carbon dioxide technology, electrolytic water, ultrasound, pulsed electric field.

Введение

Обеспечение безопасности пищевых продуктов является основной задачей пищевой промышленности. Мясо ежегодно потребляется во все мире, как основной источник белка, который очень питателен для человеческого организма. Изменение потребительских предпочтений стимулирует спрос на минимально обработанные, готовые к употреблению мясные продукты, которые являются свежими и питательными, сохраняя при этом свои естественные цвета, текстуру и вкус. Однако pH, активность воды и определенные питательные вещества, делают мясные продукты уязвимыми для заражения различными микроорганизмами [1,2]. Если не принять эффективных мер по инактивации микроорганизмов во время переработки мяса, это может привести к различным пищевым заболеваниям и представлять прямую опасность для здоровья человека. Например, присутствие *Clostridium perfringens* в мясных продуктах вырабатывает белок-нейротоксин (ботулотоксин), который может вызывать пищевые заболевания, приводящие к затруднению дыхания и параличу мышц. Кроме того, в мясных продуктах были обнаружены различные пищевые патогены, включая *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus* и *Salmonella Enteritidis*. Присутствие этих патогенных бактерий и бактерий порчи может способствовать распространению пищевых заболеваний, создавая значительные риски для здоровья потребителей [2,3]. Пищевая промышленность использует различные технологии для предотвращения или инактивации микроорганизмов, вызывающих порчу. В настоящее время основным методом стерилизации мяса и мясных продуктов в пищевой промышленности являются традиционные термические методы, такие как высокотемпературная обработка. Несмотря на то, что этот метод эффективно убивает вредные микроорганизмы и обеспечивает безопасность пищевых продуктов, использование высокой температуры может вызывать многочисленные негативные реакции, которые могут привести к снижению качества пищевых продуктов, включая потерю пищевой ценности и сенсорных свойств мяса. Аналогичным образом, хотя традиционные методы охлаждения и заморозки могут подавлять рост микробов и обеспечивать существенные преимущества при стерилизации и консервации, они часто ставят под угрозу сенсорные и питательные качества мяса и мясных продуктов, не отвечая требованиям потребителей в отношении высококачественных вариантов. В результате их использование остается ограниченным.

Для решения проблем традиционных методов стерилизации в пищевой промышленности приобрела популярность новая технология нетермической стерилизации, которая соответствует современным тенденциям в области питания, здоровья, безопасности и охраны окружающей среды [4,5]. Цель исследования - обзор современных технологий нетермической обработки и их потенциального использования в качестве альтернативы традиционным методам обработки мяса и мясных продуктов. Основное внимание уделено потенциальному применению технологий нетермической обработки в качестве альтернативы традиционным методам в переработке мяса и мясных продуктов. Представлены механизмы, преимущества и ограничения этих нетермических технологий в последние годы обобщены в отношении их применения в мясных продуктах. Кроме того, приведены примеры лабораторных исследований, демонстрирующих промышленную применимость этих технологий в отношении мяса и мясных продуктов.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Поиск научной литературы на английском языке по теме исследования проводили в библиографических базах «Scopus», «Web of Science» и «PubMed». Для отбора научных статей на русском языке провели поиск, по ключевым словам, в «Google Scholar» и «Научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU». В качестве временных рамок для обзора научных публикаций принят период 2015–2024 гг. При выполнении работы использованы научные методы поиска и скрининг научной литературы, извлечение данных, их анализ, систематизация и обобщения. При отборе публикаций для обзора приоритет отдавали высоко цитируемым источникам.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

1. Современные нетермические технологии, принцип действия

Недавнее появление технологии нетермической обработки пищевых продуктов открывает значительный потенциал для инактивации микроорганизмов и их токсинов в пищевых продуктах без необходимости нагревания. Исследование новых технологий обработки пищевых продуктов не только открывает возможности для производства более качественных продуктов питания, но и способствует снижению затрат и сокращению времени обработки [2,5,6,7]. Хотя современные нетермические технологии имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами, у них есть определенные ограничения [2,5,6].

Технология обработки высоким давлением

Технология обработки высоким давлением (НРР), также известная как технология обработки высоким статическим давлением, обычно включает использование воды или другой жидкости в качестве стерильной среды передачи давления. Пищевые продукты, запечатанные в мягкую материальную упаковку, помещаются в среду и подвергаются определенному времени высокого давления (от 100 до 1000 МПа) с целью достижения денатурации пищевых белков, инактивации ферментов, устранения микроорганизмов и улучшения характеристик пищевых продуктов [2,8]. По сравнению с традиционными методами термической стерилизации технология стерилизации НРР предлагает несколько преимуществ, таких как значительно сокращенное время обработки, меньшее потребление энергии и равномерное приложение давления с высокой эффективностью. Этот метод не только приводит к инактивации белков и ферментов, но и сохраняет структуру аминокислот в ферментных белках нетронутой. Кроме того, он не изменяет содержание витаминов, пигментов или летучих вкусовых веществ, присутствующих в пищевых материалах, одновременно продлевая их срок годности [2,5,9]. НРР напрямую воздействует на везикулы, пузырьки и протоплазму внутри микробных клеток, что приводит к деформации этих трех клеточных структур. Кроме того, НРР вызывает изменения в других клеточных структурах, такие как удлинение формы клетки, отслоение мембранной стенки и утолщение безмембранной клеточной стенки. Применение обработки НРР приводит к нарушению третичной структуры ферментов, что приводит к последующей инактивации ферментных белков. [9, 10,11]. Как правило, необратимая денатурация происходит при воздействии НРР на ферменты выше 300 МПа. На ферментативную инактивацию могут влиять многочисленные факторы, включая тип фермента, время суток и уровень pH [10,11,12].

Технология сверхкритического диоксида углерода

В конце 1980-х годов несколько японских ученых провели исследования бактерицидного действия газа высокого давления, уделив особое внимание диоксиду углерода (CO_2), в отношении биологических продуктов, термочувствительных веществ и хранящихся продуктов. В результате технология диоксида углерода высокого давления постепенно привлекла всеобщее внимание [13]. По сравнению с технологией стерилизации при нагревании сверхкритический диоксид углерода (SC-CO_2) имеет значительные преимущества: во-первых, он предотвращает ухудшение пищевой ценности, текстуры, вкуса, сенсорных свойств и других аспектов качества продуктов, вызванных высокотемпературной обработкой, при этом максимально сохраняя исходное качество; во-вторых, он представляет собой зеленую технологию обработки, которая является энергоэффективной и экологически чистой, не нанося никакого вреда окружающей среде [14]. Повышение давления в SC-CO_2 усиливает проникновение CO_2 в клетки, что приводит к изменениям как внутриклеточного, так и внеклеточного уровня

CO_2 . Последующее растворение CO_2 внутри клеток вызывает закисление, тем самым снижая внутриклеточный pH и нарушая целостность клеточных мембран, что в конечном итоге приводит к микробной инактивации. Кроме того, для SC-CO_2 были предложены альтернативные механизмы стерилизации, такие как химическая модификация и ингибирование клеточного метаболизма, которые способствуют лизису клеток и дополнительно усиливают его бактерицидную эффективность. Более того, использование этой технологии позволяет перерабатывать CO_2 , что делает ее экологически чистым и устойчивым подходом к стерилизации пищевых продуктов [15].

Технология импульсного электрического поля

Импульсное электрическое поле (ИЭП) — это новая, устойчивая и экологически чистая технология обработки пищевых продуктов. Она быстро доставляет электрическую энергию в биологические ткани, расположенные между двумя электродами, посредством чрезвычайно коротких импульсов высокой интенсивности, вызывая трансмембранную разность потенциалов в тканях и повышая проницаемость клеток через электроосмотический механизм. Благодаря своей нетермической природе, низкому потреблению энергии и быстрому времени обработки эта технология не вызывает пагубное воздействие нагревания на характеристики и чистоту экстракта, при этом максимально сохраняя исходный вкус и пищевую ценность пищи [16,17]. В настоящее время преобладает мнение, что основной механизм инактивации ИЭП сосредоточен вокруг концепций электродезинтеграции и электропорации. Концепция электродезинтеграции предполагает, что при воздействии внешнего электрического поля заряды и электролиты накапливаются внутри и снаружи клеточной мембраны, оказывая давление на мембрану. Когда трансмембранное напряжение превышает критический уровень, клеточная мембрана распадается. Напротив, теория электропорации утверждает, что под действием электрического поля происходят изменения в фосфолипидных бислоях и белковых каналах клеточной мембраны. Чувствительные к напряжению белковые каналы открываются, создавая небольшие поры в бактериальных мембранах, которые увеличивают проницаемость. В результате небольшие внешние молекулы проникают через эти поры, вызывая расширение объема бактерий, разрыв мембраны и высвобождение клеточного содержимого, что в конечном итоге приводит к повреждению или гибели бактерий [18].

Технология обработки электролитической водой

Технология электролитической воды (ЭВ) включает использование электрохимических методов для электролиза низкоконцентрированных растворов электролитов (таких как хлорид натрия, хлорид магния, хлорид калия, сульфат натрия и карбонат калия) или воды в электролизном баке. Этот процесс изменяет значение pH раствора, окисли-

тельно-восстановительный потенциал (ОВП), активность активного компонента хлора (АКК), активные формы кислорода (АФК) и другие свойства. Следовательно, он проявляет сильные окислительные характеристики и вызывает ингибирование активности ферментов, подавление микробной [19]. Что касается бактериостатического механизма электролизованной воды, он включает приложение напряжения к раствору с сильными окислительно-восстановительными возможностями, что создает разность потенциалов между катодом и анодом. Этот процесс электролиза преобразует раствор в раствор с особыми физико-химическими свойствами, которые могут изменять проницаемость клеточной мембраны и взаимодействовать с внутриклеточными компонентами, такими как ДНК и нуклеиновые кислоты, что приводит к денатурации и ингибированию метаболизма микроорганизмов, что в конечном итоге приводит к их гибели. Технология стерилизации ЭВ имеет многочисленные преимущества по сравнению с традиционными методами термической стерилизации и химическими дезинфицирующими средствами. Она демонстрирует широкий спектр стерилизующих возможностей, высокую эффективность, простоту эксплуатации, отсутствие загрязнения или рисков для безопасности и экологическую устойчивость. Кроме того, ЭВ сохраняет естественные физические и питательные свойства продуктов питания. Следовательно, ЭВ стала важной областью исследований для научных исследований продуктов питания во всем мире [20].

Ультразвуковая технология

Ультразвук (УЗ) — это быстрая, универсальная и неразрушающая зеленая технология, широко применяемая в сфере обработки пищевых продуктов для повышения качества продуктов питания и обеспечения их безопасности. По частоте УЗ можно разделить на высокочастотный УЗ (20 кГц ~ 40 кГц) и низкочастотный УЗ (40 кГц ~ 1 МГц). Области применения ультразвуковых волн с различными частотами в обработке пищевых продуктов имеют различия [2,21,22]. УЗ, как перспективная технология нетермической стерилизации, эффективнее традиционной термической обработки. Эффект кавитации, вызванный УЗ-обработкой, нарушает целостность клеточных мембран, что приводит к высвобождению внутриклеточных белков и молекул ДНК, тем самым достигая микробной инактивации. Кроме того, обширные исследования, проведенные учеными, выявили механизм, посредством которого УЗ снижает бактериальный метаболизм, ослабляя активность соответствующих метаболических ферментов [2,22, 23].

Технология импульсного света

Импульсный свет (PL), также называемый высокоинтенсивным спектральным импульсным светом, состоит из блока питания и блока источника света. Он использует мгновенные импульсы (мощность) и инертный газ (источник света) для излучения высокоэнергетического, широкоспектрального импульсного «белого света» для достижения стерили-

зации посредством фотохимических и фотофизических эффектов. Излучаемое электромагнитное излучение охватывает диапазон длин волн 100–1100 нм, охватывая ультрафиолетовую и ближнюю инфракрасную области [2,24]. Эта технология объединяет коротковолновый УФ-свет с высокой энергией для подавления роста микробов посредством фотохимической активности, вызывая постоянные изменения в молекуле ДНК, которые препятствуют пролиферации клеток и в итоге приводят к инактивации клеток. Фотофизические и фототермические эффекты процесса PL также способствуют микробной деконтаминации. Более сильная инфракрасная составляющая света производит локализованный фототермический эффект, что приводит к перегреву, повреждению клеток и разрыву. На процесс стерилизации PL влияют различные физические факторы, такие как скорость потока, поток импульса или интенсивность света, количество вспышек, уровень энергии импульса, приложенное напряжение, расстояние от лампы до образца и содержание УФ-излучения; тип образца; упаковка; и штамм микробов [7,10,25].

Нетермическая плазменная технология

Плазменная обработка — это инновационная биоцидная технология. Плазма представляет собой четвертое состояние вещества после твердых тел, жидкостей и газов. Она делится на термическую и нетермическую плазму (НТП) [7,26,27] НТП также считается низкотемпературной плазмой, атмосферной холодной плазмой или холодной плазмой (ХП) Технология ХП подразумевает использование частично или полностью ионизированных газов, включая положительно и/или отрицательно заряженные ионы, атомы, возбужденные молекулы, электроны, свободные радикалы, фотоны и другие реактивные вещества (РВ) без наличия термодинамического равновесия [1,26] Таким образом, это высокоэнергетическая химическая среда, объединяющая частицы и излучение различной природы. Газы, которые в настоящее время подвергаются ионизации, — это воздух, азот (N_2), кислород (O_2) или определенные смеси инертных газов, таких как аргон (Ar), гелий (He) или неон (Ne). НТП генерируется различными методами разряда, такими как тлеющие разряды, радиочастотные волновые разряды, микроволновые разряды, диэлектрические барьерные разряды (DBD), коронные разряды, скользящие дуговые разряды или плазменные струи [7,28]. Можно выделить три системы проектирования на основе размещения пищи относительно результирующей плазмы, включая системы дистанционной обработки, прямой обработки и электродного контакта. В частности, как прямые, так и косвенные методы могут использоваться для пищевых продуктов любой формы [29].

НТП имеет повышенные коэффициенты диффузии и широкий спектр активности против патогенных и вызывающих порчу микроорганизмов, биопленок и спор. Механизмы НТП, которые вызывают микробное повреждение или гибель, включают (I) способность НТП и его активных видов ингибировать образование биопленки, влияя на ее

прикрепление, созревание, регуляцию и диффузию, обеспечивая хороший контроль над ее образованием [30]; (II) присущую фотодесорбцию УФ-фотонов, которая разрушает мембраны и внутренние клеточные компоненты, что приводит к утечке цитоплазматических и клеточных компонентов и облегчает проникновение свободных радикалов для ингибирования микроорганизмов [26,31]; (III) прямое генетическое повреждение, которое предотвращает репликацию ДНК и в конечном итоге приводит к гибели клетки [26,32]; (IV) прямое генетическое повреждение, которое предотвращает репликацию ДНК и в конечном итоге приводит к гибели клетки [26,33]; и (V) прямое генетическое повреждение, которое препятствует репликации ДНК и в конечном итоге приводит к гибели клетки [26,34].

2. Применение современных технологий обработки для мяса и мясных продуктов

В свете проблем, вызванных глобализацией и разнообразными требованиями потребителей к высококачественным и богатым питательными веществами продуктам, технология нетермической стерилизации в пищевой промышленности не только максимизирует сохранение естественного качества продуктов, но и улучшает функциональные характеристики и пищевую ценность. Следовательно, она стала фокусной точкой и областью интенсивного интереса в пищевой промышленности [7].

Технологии и области применения обработки высоким давлением

Общеизвестно, что HPP больше подходит для консервирования обработанного мяса, чем сырого. С 1990 года метод HPP успешно применяется в пищевой промышленности для дезактивации микроорганизмов и получил одобрение от регулирующих органов, таких как Управление по контролю за продуктами и лекарствами США (FDA), Министерство сельского хозяйства США (USDA), Европейское агентство по безопасности пищевых продуктов (EFSA), Министерство здравоохранения Канады и других. В настоящее время во всем мире установлено около 420 машин HPP, около 30% из которых предназначены для консервирования вареных и вяленых мясных продуктов [35]. Carrapiso *et al.* исследовали влияние HPP и температуры хранения на количество микроорганизмов, цвет и окислительную стабильность нарезанного вяленого иберийского ребра. Применение давления 600 МПа в течение 8 минут эффективно уменьшило количество всех присутствующих микроорганизмов, не нарушая целостности цвета или уровней окисления. Кроме того, количество колиформных бактерий превысило допустимые пределы при 4 °C после хранения при 20 °C, что указывает на необходимость холодного хранения для длительного сохранения, чтобы гарантировать безопасность вырезки [12]. Ученые Riekkinen *et al.* исследовали эффективность различных давлений при дезактивации *L. monocytogenes* в готовых к употреблению (RTE) рыбных продуктах из радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*) в условиях холодной и теплой фумигации. Результаты показали, что давление 600 МПа продемонстрировало

наивысшую эффективность даже после 28 дней хранения, гарантируя, что количество колоний *L. monocytogenes* в образцах рыбы как холодного, так и горячего копчения оставалось ниже нормативного предела (100 КОЕ г⁻¹), установленного Регламентом (ЕС) 2073/2005 [36]. Хотя технология HPP предлагает преимущества холодной стерилизации для различных пищевых продуктов, ее глобальное применение остается ограниченным. Отсутствие стандартизированных процессов и критериев оценки, особенно с точки зрения микроорганизмов порчи и их влияния на срок годности продукта, препятствует широкому внедрению промышленного использования обработки пищевых продуктов HPP. Кроме того, высокая стоимость оборудования HPP и ограниченные возможности пакетной обработки способствуют высокой стоимости пищевых продуктов HPP. Технология стерилизации HPP не получила широкого распространения в пищевой промышленности из-за ее неспособности к непрерывному производству [2,35].

Технология и применение сверхкритического диоксида углерода

Преимущества технологии СК-СО₂ включают простоту внедрения процесса из-за низкой критической точки (31 °C и 73,9 бар), что позволяет эффективно контролировать процесс при низком давлении, а также относительно низкие инвестиционные затраты. Кроме того, СК-СО₂ обладает низкой вязкостью, что облегчает его проникновение в твердые матрицы, такие как мясные продукты, во время процессов экстракции. Однако следует отметить, что технология СК-СО₂ требует сравнительно более длительного времени обработки для инактивации микроорганизмов. Santi *et al.* [15] изучали влияние обработки диоксидом углерода под высоким давлением на сырое мясо куриной грудки, уделяя особое внимание инактивации микроорганизмов и снижению остатков. После обработки СК-СО₂ наблюдалось заметное снижение на 1,3 Log КОЕ г⁻¹ *E. coli* и 1,4 Log КОЕ г⁻¹ *L. innocua* в свежем мясе куриной грудки. Между тем, Gonzalez-Alonso *et al.* исследовали влияние обработки сверхкритическим диоксидом углерода на микробные популяции в сырой курице. Обработка высоким давлением проводилась при температуре 40 °C, 80 °C или 140 °C в течение 15–45 мин. Количество *E. coli* снизилось на 1,4 log КОЕ г⁻¹ после 15-минутной обработки и еще на 5 log после 45-минутной обработки, при этом значительное снижение наблюдалось также у термофильных микроорганизмов [37]. В настоящее время исследования технологии стерилизации СК-СО₂ в пищевых продуктах в основном сосредоточены на жидких продуктах, таких как яблочный сок, апельсиновый сок и молоко, с меньшим акцентом на мясе и мясных продуктах. Будущие исследования должны глубже изучить эффективность воздействия СК-СО₂ сенсорные и питательные свойства различных мясных продуктов, а также усовершенствовать методы обработки, чтобы обеспечить промышленное применение стерилизации СК-СО₂ в этом секторе. Комбинирование СК-СО₂

с другими нетермическими технологиями или добавками является ключевой областью интереса в нетермической стерилизации. Однако преобладающее внимание к объединению СК-СО₂ с ультразвуком может препятствовать развитию и использованию нетермической технологии в мясных продуктах, замедляя индустриализацию стерилизации СК-СО₂ [38].

Технология импульсного электрического поля и ее применение

В дополнение к хорошо известным природным антибактериальным агентам, обработка PEF продолжительностью менее 1 с продемонстрировала эффективность в снижении количества бактерий при сохранении свежести пищевых продуктов. Однако следует отметить, что мягкие условия обработки PEF недостаточны для инактивации спор и грамположительных бактерий. Следовательно, интенсивности обработки, превышающие 25 кВ см⁻¹, эффективно уничтожают микроорганизмы; тем не менее, более высокие уровни интенсивности PEF могут негативно влиять на сенсорное восприятие пищевых продуктов [2]. Karki et al. исследовали влияние холодного хранения на качество, усвояемость белка *in vitro* и рост микроорганизмов в вакуумно-запечатанных (SV) стейках рибай из говядины (SR), которые были предварительно обработаны импульсным электрическим полем (PEF) [39]. Результаты показали, что обработка PEF значительно улучшила нежность SR, обработанного SV, не влияя на потери при приготовлении, адгезию и эластичность и т. д. Кроме того, количество бактерий во всех образцах оставалось ниже предела обнаружения 10² КОЕ г⁻¹ в течение как минимум 21 дня при хранении в холодильнике при 4 °С. Таким образом, можно сделать вывод, что время и температура SV, использованные в этом исследовании, были достаточными для инактивации патогенов в SR. Однако важно отметить, что споры способны выживать при обработке PEF и SV. Если на продукте присутствуют споры, способные прорасти и расти при 4 °С, они могут потенциально ограничить срок его хранения. Naughton et al. изучали эффективность обработки PEF в дезактивации различных микроорганизмов, обнаруженных в жидких средах и сырой курице. Была исследована восприимчивость 10 изолятов *Campylobacter*, *E. coli* и *S. Enteritidis* к обработке PEF в жидкой среде. Было отмечено, что *Campylobacter* продемонстрировали повышенную чувствительность к обработке PEF по сравнению с *E. coli* и *Streptococcus Enteritidis*, что указывает на потенциальные возможности снижения уровня *Campylobacter* в горячей или холодной воде, используемой для обработки курицы [40]. Технология PEF, известная своим незначительным временем обработки и мощными бактерицидными свойствами, привлекла внимание исследователей. Чтобы способствовать ее широкому внедрению в пищевую промышленность, следует направить усилия на повышение ее применимости, снижение производственных затрат и совершенствование высоковольтного источника питания и регулировки

электродов. Необходимы дальнейшие исследования для оптимизации оборудования технологии PEF и изучения синергии с другими методами стерилизации для повышения ее эффективности в более крупных масштабах [2,41].

Технология электролиза воды и ее применение

В настоящее время ЭВ широко используется для дезинфекции в секторах переработки пищевых продуктов и общественного питания из-за его новой, безопасной и экологичной природы. Исследования показали, что мощная кислотная электролизованная вода может эффективно удалять микробы с внешних поверхностей оборудования для переработки пищевых продуктов, а также со свежих фруктов и овощей [2,7] Lan et al. исследовали влияние комбинирования LC-MRP с предварительной обработкой слабокислой электролизованной водой (СКЭВ) на холодное хранение вакуумно упакованного морского окуня [42]. Результаты показали, что комбинированная обработка СКЭВ и LC-MRP продемонстрировала высокую эффективность в подавлении роста бактерий. На протяжении всего периода хранения все группы продемонстрировали значительную тенденцию к увеличению ($P < 0,05$) общего количества жизнеспособных микроорганизмов (ОМЧ). На 10-й день ОМЧ группы DW был зарегистрирован на уровне $7,08 \pm 0,02 \log \text{КОЕ г}^{-1}$, что превышает предел порчи $7 \log \text{КОЕ г}^{-1}$. Аналогично, ОМЧ групп СКЭВ и LC-MRPs превысили предел порчи на 13-й и 18-й дни соответственно, достигнув значений 7,40 и 7,65 $\log \text{КОЕ г}^{-1}$. Напротив, только на 20-й день ОМЧ группы SM превысил предел порчи, что указывает на то, что СКЭВ в сочетании с LC-MRPs эффективно сдерживали рост микроорганизмов в морском окуне. Chang et al. исследовали влияние продолжительности обработки концентрацией доступного хлора и соотношения твердого вещества и жидкости на скорость ингибирования бактерий у креветок, обработанных СКЭВ [19]. После 6 дней хранения общее количество колоний в контрольной группе превысило допустимые пределы для количества колоний креветок, тогда как группа СКЭВ достигла уровня свежести в диапазоне 5,00–5,70 $\log \text{КОЕ г}^{-1}$, что указывает на то, что все обработки СКЭВ в некоторой степени подавляли рост микроорганизмов на креветках. После 8 дней хранения только группа СКЭВ имела общее количество колоний в допустимых пределах, что свидетельствует о том, что обработка SAEW оказала превосходное ингибирующее действие на креветок и продлила срок их хранения более чем на 2 дня. Общее количество колоний в группе СКЭВ оставалось в допустимых пределах, что указывает на то, что обработка СКЭВ оказала оптимальное ингибирующее действие на креветок.

Кислотная электролизованная вода — это новая технология консервирования, которая предполагает эффективно задержать повышение pH мясных продуктов, подавить рост бактерий и сократить потери воды. Текущие исследования кислотной электролизованной воды в первую очередь сосре-

доточены на оценке ее стерилизующего и консервирующего эффекта, при этом механизм консервирования все еще не полностью изучен. Технология все еще находится в экспериментальной фазе, что требует дальнейшего изучения механизма ее формирования, влияющих факторов, бактерицидных активных компонентов, оценки безопасности и воздействия на сенсорные и пищевые качества мясных продуктов [2].

Ультразвуковые технологии и их применение

Ультразвуковая обработка пищевых продуктов подразумевает мгновенную передачу акустической энергии продукту посредством применения высокочастотных акустических волн, превышающих 20 кГц. Этот неинвазивный метод эффективно подавляет такие патогены, как *E. coli*, *Salmonella* и *L. monocytogenes*. Кроме того, по сравнению с традиционными методами термической обработки, он сводит к минимуму пагубное воздействие на сенсорные и пищевые свойства, обеспечивая при этом экономическую эффективность и сокращенное время обработки [2,43]. Li et al. использовали сочетание обработки ультразвуком (УЗ, 200 Вт и 30 кГц) и слабокислой электролизованной водой (СКЭВ, 60 мг л⁻¹, pH = 6,2) для изучения комбинированного механизма воздействия и дезинфекции для проведения экспериментов по свежести на зеркальном карпе во время хранения в холодильнике при температуре 4 °C [44]. Микробиологические результаты показали, что УЗ + СКЭВ эффективно подавляли рост *Pseudomonas*, одновременно подавляя внутреннюю ферментативную функцию. Кроме того, эта процедура нарушала клеточную мембрану *Pseudomonas*, что приводило к увеличению утечки нуклеиновых кислот и белков, а также к значительному ингибированию антиоксидантной ферментативной функции. Этот новаторский подход представляет собой новую промышленную технологию сохранения охлажденной рыбы. Wang et al. (2024) изучали свойства размораживания говядины с использованием ультразвука с деионизированной водой (ДИВ) и активированной плазмой водой (ХП) [23]. Результаты показали, что общее количество жизнеспособных бактерий в образцах говядины после обработки составило $4,46 \pm 0,009$, $3,866 \pm 0,027$, $4,11 \pm 0,008$ и $3,54 \pm 0,020$ log₁₀ КОЕ г⁻¹ соответственно, в то время как общее количество колоний в среде составило $3,85 \pm 0,005$, $1,66 \pm 0,083$, $3,52 \pm 0,013$ и $1,50 \pm 0,142$ log₁₀ КОЕ мл⁻¹ соответственно. Использование оттаивания плазменно-активированной водой (ПАВ) и комбинированного ультразвукового оттаивания значительно снизило бактериальную колонизацию как в образцах говядины, так и в средах для оттаивания. Комбинированная обработка продемонстрировала наиболее эффективное бактерицидное воздействие на бактерии, за ней следует группа ДИВ что указывает на хороший бактерицидный эффект от использования. Кроме того, анализ структуры белка показал, что обработка увеличила упорядоченную структуру белка, а также стабилизировала их общую конфи-

гурацию. Эти результаты в совокупности демонстрируют возможность использования ультразвука в сочетании с ПАВ в приложениях по размораживанию мяса. В то время как ультразвуковая комбинированная технология демонстрирует потенциал для стерилизации пищевых продуктов за счет сохранения качества продуктов питания и минимизации повреждения функциональных компонентов, текущие исследования в первую очередь сосредоточены на эффектах ультразвуковой инактивации спор, а не на изучении ультраструктурных и молекулярных изменений. Механизм воздействия ультразвуковой кавитации на многослойную структуру спор остается неясным, и необходимы систематические исследования по снижению термической устойчивости спор. Более того, споры могут прорасти при подходящих условиях, трансформируясь в вегетативные формы, которые представляют риск для безопасности пищевых продуктов. Изучение восстановления прорастания и роста спор после ультразвуковой обработки имеет решающее значение для решения этой проблемы [44].

Технологии импульсного света и их применение

Большая часть энергии, используемой в технологии PL, поступает из ультрафиолетового сегмента электромагнитного спектра. Однако одно заметное преимущество PL перед статической УФ-обработкой заключается в ее способности быстро доставлять энергию к пищевым продуктам [7,24]. Кроме того, эта технология вызывает минимальные сенсорные и питательные изменения, что делает ее пригодной для обработки мясных продуктов с высоким содержанием жира и белка. Тем не менее, при использовании в высоких концентрациях во время микробной инактивации PL может вызывать изменения состава и цвета, а также изменения свойств, вызванные перегревом. Baptista et al. провели исследование по использованию технологии PL для контроля *Campylobacter* в мясе птицы [45]. Инактивация микроорганизмов PL объясняется фототермическими (тепловые эффекты из-за повышенной температуры), фотохимическими (ингибирование образования новой цепи ДНК во время репликации ДНК из-за образования димеров) и/или фотофизическими (повреждение клеточной мембраны и элюция белка) механизмами, влияющими на грамотрицательные бактерии больше, чем на грамположительные.

Количество *Enterobacteriaceae* в образцах, обработанных PL, было снижено примерно на 1–1,3 log КОЕ г⁻¹ по сравнению с необработанными образцами, в то время как при обработке 3 (3 см и 2828 В) с более высокой дозой энергии $9,68 \pm 0,15$ Дж см⁻² количество *Campylobacter* было значительно ниже ($4,5 \pm 0,01$ log КОЕ г⁻¹, $P < 0,05$). Результаты подтвердили, что PL помогает контролировать присутствие *Enterobacteriaceae* или потенциальных патогенов этого семейства бактерий в мясе птицы. Duma Kokan et al. [46] исследовали влияние применения импульсного света на физико-химические, технические и сенсорные свойства, пищевой состав и продление срока годности охлажденной свинины

longissimus dorsi. Результаты показали, что после 10 дней замороженного хранения общее количество жизнеспособных бактерий в группе, обработанной импульсным светом, снизилось примерно на $1,51 \times 10^6$ КОЕ г^{-1} по сравнению с контрольной группой. Это снижение можно объяснить фотохимическим эффектом импульсного света, который вызывает повреждение клеточных мембран и, следовательно, приводит к значительному уменьшению общего количества микроорганизмов, присутствующих на поверхности свинины. Результаты также продемонстрировали, что применение импульсного света привело к положительным результатам за счет снижения индекса TBARS, окислительно-восстановительного потенциала и уровней активности воды. Следовательно, эта инновационная технология демонстрирует значительный потенциал для продления срока годности сырого мяса без ущерба для его качества. Стерилизация импульсным светом, современная нетермическая технология, имеет явные преимущества по сравнению с традиционными термическими и химическими методами стерилизации. Она не только повышает долговечность хранения и текстуру продуктов, но и остается недостаточно используемой в пищевом секторе. Проблемы возникают из-за различий в разновидностях оборудования, условиях тестирования и повторяемости. Отсутствие стандартизированных процедур еще больше усложняет ее широкое применение. Кроме того, ограничение, налагаемое руководством FDA 1996 года на поток импульсов до 12 Дж см^{-2} , препятствует исследовательским усилиям, поскольку многочисленные исследования превышают этот предел. Переоценка этого стандарта и потенциальное повышение порога потока импульсов заслуживают рассмотрения. Принятие междисциплинарной стратегии путем интеграции импульсного света с такими технологиями, как плазма, сверхвысокое давление, антибактериальные агенты и фотосенсибилизаторы, может способствовать развитию для более эффективных методов стерилизации продуктов питания и технологий обработки продуктов питания [47].

Нетермические плазменные технологии и их применение

Факторы, влияющие на антимикробную эффективность НТП, можно разделить на 3 группы: технологические, микробные и факторы продукта/окружающей среды. Технологические факторы включают напряжение, частоту, тип и концентрацию газа, время обработки и схему воздействия [26,48]. Увеличение напряжения, частоты и подачи тока может значительно увеличить инактивацию микроорганизмов. Аналогичным образом, тип газа имеет решающее значение, поскольку химия плазмы зависит от природы газовой среды. Время обработки является еще одним условием, которое может существенно повлиять на эффективность НТП [49]. Длительное время обработки НТП приводит к более высоким концентрациям активных веществ, снижает pH и увеличивает смертность микроорганизмов, особенно тех микроорганизмов, которые находятся во внутренних слоях биопленки.

Целевой микроорганизм играет ключевую роль. Тип бактерий, штамм, способ присутствия (трофобласт или спора) и концентрация являются основными микробными факторами, которые коррелируют с эффективностью инактивации НТП [50]. Эффективность НТП тесно связана с состоянием продукта, составом и структурными характеристиками. Состав, топология поверхности и содержание воды в продукте являются другими важными факторами. Особенно на шероховатых поверхностях бактерии могут прилипать в несколько слоев, что может препятствовать диффузии плазмы [51]. Наконец, содержание влаги, а также влажность окружающей среды положительно коррелируют с эффективностью плазменной обработки. В обоих случаях присутствие воды увеличивает концентрацию гидроксильных радикалов, что приводит к более высоким скоростям окисления. Hu et al. использовали атмосферную холодную плазму (АСП) для изучения эффектов на сохранность красных креветок в холодильной цепи хранения [52]. Результаты показали, что циклическая обработка атмосферной холодной плазмой значительно подавила рост микроорганизмов и значений TVB-N у креветок по сравнению с однократной обработкой. Через 8 дней общее микробное число (ОМЧ) контрольной группы, групп АСП-3 мин (1 Т) и АСП-1 мин (3Т) составили $6,29 \log \text{КОЕ г}^{-1}$, $5,76 \log \text{КОЕ г}^{-1}$ и $5,56 \log \text{КОЕ г}^{-1}$ соответственно. Бактериальная нагрузка в размере $6 \log \text{КОЕ г}^{-1}$ мяса креветок считалась приемлемым пределом для водного продукта. Только ОМЧ контрольной группы превысила этот рекомендуемый предел, в то время как у циклической группы она была значительно ниже, чем у группы одноразовой обработки НТП ($P < 0,05$). Ученые Xu et al. [53] исследовали влияние на микробную безопасность и качество тканей говядины, сравнивая обработку микроэлектродной плазмой с гелием и воздухом. Для свежих ломтиков говядины обработка плазмой с воздухом показала более высокую антимикробную активность в отношении *S. aureus* и *E. coli*, чем обработка плазмой SMD с гелием (1,5 против 0,9; 0,9 против 0,28 $\log \text{КОЕ г}^{-1}$ при 10 мин). В этом исследовании сравнительный анализ ролей ROS, $\cdot\text{OH}$ и O_3 в микробной инактивации. Согласно нашему исследованию, это может быть роль O_3 , который является долгоживущим (около 10 мин) и гидрофобным ROS, легко диффундирующим в ткани и вызывающим инактивацию *E. coli* и *S. aureus*. НТП также имеет некоторые недостатки. Исследования показали, что продукты с высоким содержанием жира не подходят для этой обработки, поскольку липиды окисляются и вызывают прогорклость. Кроме того, было обнаружено, что НТП повышает кислотность, снижает твердость и вызывает изменение цвета некоторых фруктов и овощей. Кроме того, шероховатость и неровности на поверхности пищи могут препятствовать бактерицидному эффекту НТП [2, 26]

Проблемы и перспективы на будущее

Разработка и применение новой технологии нетермической стерилизации пищевых продуктов,

характеризующейся экологичным подходом к обработке с низким потреблением энергии и минимальным загрязнением, эффективно решили многочисленные проблемы, связанные с традиционными методами термической стерилизации [2,54] Однако некоторые технологии все еще находятся на экспериментальной стадии исследований и не могут быть быстро внедрены в крупномасштабных или практических производственных условиях. Основные причины этого ограничения следующие:

1. Законы и правила: Законы и правила, касающиеся технологии нетермической обработки, устарели по сравнению с традиционными термическими методами, что приводит к отсутствию современных стандартов и санитарных правил безопасности и процесса обработки [55].

2. Затраты на техническое перевооружение: на сегодняшний день заводское оборудование состоит из дорогостоящих, крупногабаритных механических деталей, которые не подходят для широкого использования, как традиционные методы. Следовательно, научному сообществу необходимо углубиться в базовые механизмы связанных технологий, а также усилить глобальное сотрудничество для продвижения внедрения зеленой, экологически чистой и эффективной технологии нетермической стерилизации в переработке мяса и мясных продуктов [56].

3. Ограничения текущих исследований: необходимы фундаментальные исследования для выяснения микробных механизмов реакции на стресс, адаптации и «перекрестной толерантности» (как общих, так и штамм-специфических) для устранения фактических ограничений этого подхода. Поэтому будущие исследования должны быть сосредоточены на разработке различных технических комбинаций методов стерилизации для создания более полной теоретической основы для технологии стерилизации без термической обработки.

Выводы

Разработка современных новых нетермических технологий в качестве замены методам термической обработки является результатом усилий пищевой промышленности по производству здоровых, безопасных, обладающих высокой пищевой ценностью и длительным сроком хранения пищевых продуктов. Нетермические технологии обработки и стерилизации имеют значительные преимущества по сравнению с термическими процессами из-за сокращенных требований к времени обработки, использования низких температур и уровней потребления энергии, а также улучшения характеристик качества пищевых продуктов, цвет, вкус и возможности сохранения питательных веществ при одновременном увеличении функциональности. Более того, эти технологии демонстрируют превосходные характеристики экологической устойчивости и способствуют увеличению срока годности продукта. Поэтому, с целью обеспечения широкого внедрения технологий нетермической обработки в пищевую промышленность и удовлетворения запросов современного потребителя, необходимы

дальнейшие фундаментальные исследования, масштабные инвестиции в научные исследования и разработки.

Литература

1. Urugo, M.M., Teka, T.A., Berihune, R.A. *et al.* Novel non-thermal food processing techniques and their mechanism of action in mycotoxins decontamination of foods // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2023.V. 85. p. 103312. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103312>
2. Бурак, Л. Ч. Ограничения и возможности современных технологий обеспечению микробиологической безопасности пищевых продуктов // *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*. 2024. № 23(396). С. 6-13. <https://doi.org/10.26297/0579-3009.2024.2-3.1>
3. Chiozzi, V., Agriopoulou, S. & Varzakas, T. Advances, applications, and comparison of thermal (pasteurization, sterilization, and aseptic packaging) against non-thermal (ultrasounds, UV radiation, ozonation, high hydrostatic pressure) Technologies in Food Processing // *Applied Sciences-Basel*. 2022.V. 12(4). p. 2202. <https://doi.org/10.3390/app12042202>
4. Pandiselvam, R., Mitharwal, S., Rani, P. *et al.* The influence of non-thermal technologies on color pigments of food materials: an updated review // *Current Research in Food Science*. 2023. V. 6. p. 100529. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100529>
5. Бурак, Л. Ч., Завалей А.П. Эффективность комбинированного воздействия ультразвука и микроволн при обработке пищевых продуктов. Обзор // *Техника и технология пищевых производств*. 2024.Т. 54, № 2. С. 342-357 <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-2-2510>
6. Dash, D.R., Singh, S.K. & Singha, P. Recent advances on the impact of novel non-thermal technologies on structure and functionality of plant proteins: a comprehensive review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2022.V.64(10). pp. 3151–3166. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2130161>
7. Бурак, Л. Ч. Влияние современных способов обработки и стерилизации на качество плодово-овощного сырья и соковой продукции // *Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр ИНФРА-М»*, 2025. 236 с. ISBN 978-5-16-020036-1. <https://doi.org/10.12737/0.12737/2154991>
8. Argyri, A.A., Papadopoulou, O.S., Tassou, C.C. & Chorianopoulos, N. Effect of high pressure processing on the survival of salmonella enteritidis and shelf-life of chicken fillets // *Food Microbiology*. 2018.V. 70. pp. 55–64. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2017.08.019>
9. Okur, G., Tavman, S., Tsutsuura, S. & Nishiumi, T. Effect of high pressure processing on traditional Turkish meatballs properties and microbiological safety during frozen storage // *LWT- Food Science and Technology*. 2023.V. 185. p. 115110. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115110>
10. Бурак, Л. Ч. Использование современных технологий обработки для увеличения срока хранения фруктов и овощей. Обзор предметного поля //

Ползуновский вестник. 2024. № 1. С. 99-119. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.013>

11. Бурак, Л. Ч. Влияние технологии высокого давления на ферментативную активность фруктовых консервов // Научное обозрение. Биологические науки. 2022. № 4. С. 63-73. <https://doi.org/10.17513/srbs.1296>

12. Carrapiso, A.I., Tejerina, D., García Torres, S. et al. High-pressure processing applied to sliced dry-cured Iberian loin: effect of category, company, and storage temperature // Food Science & Nutrition. 2023. V. 11. pp. 5512–5522. <https://doi.org/10.1002/fsn.3.3507>

13. Chen, Z., Spilimbergo, S., Khaneghah, A.M., Zhu, Z.Z. & Marszalek, K. The effect of supercritical carbon dioxide on the physiochemistry, endogenous enzymes, and nutritional composition of fruit and vegetables and its prospects for industrial application: a overview // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2022. V.64(17). pp.5685–5699 <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2157370>

14. de Aguiar, A.C., Vardanega, R., Viganó, J. & Silva, E.K. Supercritical carbon dioxide technology for recovering valuable phytochemicals from Cannabis sativa L. and valorization of its biomass for food applications // Molecules.2023.V. 28. p. 3849. <https://doi.org/10.3390/molecules28093849>

15. Santi, F., Zulli, R., Lincetti, E., Zambon, A. & Spilimbergo, S. Investigating the effect of rosemary essential oil, supercritical CO₂ processing and their synergism on the quality and microbial inactivation of chicken breast meat//Food. 2023.V. 12. p. 1786. <https://doi.org/10.3390/foods12091786>

16. Zhang, X.Y., Li, Z.R., Zheng, X.J., Wen, W.J. & Wang, X.W. Characteristics of quinoa protein isolate treated by pulsed electric field // Food. 2024.V. 13. p. 148. <https://doi.org/10.3390/foods13010148>

17. Бурак, Л. Ч., Сапач, А.Н. Влияние предварительной обработки импульсным электрическим полем на процесс сушки: обзор предметного поля // Хранение и переработка сельхозсырья. 2023. № 2. С. 44-71. <https://doi.org/10.36107/spfp.2023.418>

18. Bahrami, A., Baboli, Z.M., Schimmel, K., Jafari, S.M. & Williams, L. Efficiency of novel processing technologies for the control of Listeria monocytogenes in food products //Trends in Food Science & Technology. 2020.V. 96. pp. 61–78 <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.12.009>

19. Chang, G., Liu, Y., Luo, Z. et al. Response surface methodology to optimize the sterilization process of slightly acidic electrolyzed water for Chinese shrimp (*Fenneropenaeus chinensis*) and to investigate its effect on shrimp quality // Food Chemistry X. 2024. V.21. p. 101180 <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101180>

20. Chen, Q.R., Zhou, Y.F., Yun, X.Y. et al. Bactericidal efficacy and mechanisms of non-electrolytic slightly acidic hypochlorous water on *Pseudomonas fragi* and *Pseudomonas fluorescens* // Food. 2023. V. 12. p.3980. <https://doi.org/10.3390/foods12213980>

21. Li, M.G., Zhou, C.S., Wang, B. et al. Research progress and application of ultrasonic- and microwave-

assisted food processing technology // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2023. V. 22. pp. 3707–3731. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13198>

22. Бурак, Л. Ч., Сапач, А.Н., Писарик, М.И. Влияние ультразвука на процесс замораживания и качество замороженных фруктов и овощей // Вестник Международной академии холода. 2024. № 1. С. 71-78. <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2024-23-1-71-78>

23. Wang, H.X., Ding, C.J., Lu, J.L. et al. Study on the thawing characteristics of beef in ultrasound combined with plasma-activated water // Food Chemistry. 2024.V. 21. p. 101104. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.101104>

24. Borges, A., Baptista, E., Aymerich, T., Alves, S.P., Gama, L.T. & Fraqueza, M.J. Inactivation of *Listeria monocytogenes* by pulsed light in packaged and sliced salpicão, a ready-to-eat traditional cured smoked meat sausage // LWT- Food Science and Technology. 2023. V.179. p. 114641. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114641>

25. Liu, S.L., Chen, S.S., Shao, L.T. et al. Spoilage bacteria growth reduction and microbial community variation of chilled chicken packaged in PA/PE treated with pulsed light // Food Control. 2024. V. 157. P. 110196. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.110196>

26. Бурак, Л. Ч., Сапач А.Н, Завалей А.П. Влияние обработки холодной плазмой на качество и пищевую ценность растительного сырья. Обзор предметного поля // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2024. Т. 14, № 2(49). С. 173–183. <https://doi.org/10.21285/achb.914>

27. Birania, S., Attkan, A.K., Kumar, S., Kumar, N. & Singh, V.K. Cold plasma in food processing and preservation: a review // Journal of Food Process Engineering. 2022.V. 4. p 2848. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14110>

28. Usman, I., Afzaal, M., Imran, A. et al. Recent updates and perspectives of plasma in food processing: a review // International Journal of Food Properties. 2023.V. 26. pp. 552–566. <https://doi.org/10.1080/10942912.2023.2171052>

29. Akhtar, J., Abrha, M.G., Teklehaimanot, K. & Gebrekirstos, G. Cold plasma technology: fundamentals and effect on quality of meat and its products // Food and Agricultural Immunology. 2022.V. 33. pp. 451–478. <https://doi.org/10.1080/09540105.2022.2095987>

30. Asl, P.J., Rajulapati, V., Gavahian, M. et al. Non-thermal plasma technique for preservation of fresh foods: a review // Food Control. 2022.V. 134. P.108560. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108560>

31. Jaddu, S., Sonkar, S., Seth, D. et al. Cold plasma: unveiling its impact on hydration, rheology, nutritional, and anti-nutritional properties in food materials – an overview // Food Chemistry X. 2024.V. 22. p. 101266. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101266>

32. Ravash, N., Hesari, J., Feizollahi, E., Dhaliwal, H.K. & Roopesh, M.S. Valorization of cold

plasma technologies for eliminating biological and chemical food hazards // *Food Engineering Reviews*. 2024.V. 16. pp. 22–58. <https://doi.org/10.1007/s12393-023-09348-0>

33. Komarudin, A.G., Nei, D., Kameya, H., Sotome, I. & Araki, T. Characterization of a non-thermal plasma-bubbling system as a novel sanitizer: physico-chemical properties, bactericidal effect, and reactive species // *Food Science and Technology Research*. 2023.V. 29. pp. 365–376. <https://doi.org/10.3136/fstr.FSTR-D-23-00011>

34. Roshanak, S., Maleki, M., Sani, M.A., Tavassoli, M., Pirkhezranian, Z. & Shahidi, F. The impact of cold plasma innovative technology on quality and safety of refrigerated hamburger: analysis of microbial safety and physicochemical properties // *International Journal of Food Microbiology*. 2023. V. 388. p. 110066. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.110066>

35. Tsevdou, M., Dimopoulos, G., Limnaios, A., Semenoglou, I., Tsironi, T. & Taoukis, P. High pressure processing under mild conditions for bacterial mitigation and shelf life extension of European Sea bass fillets // *Applied Sciences-Basel*. 2023.V. 13(6). p. 3845. <https://doi.org/10.3390/app13063845>

36. Riekkinen, K., Martikainen, K. & Korhonen, J. Effectiveness of high-pressure processing treatment for inactivation of *Listeria monocytogenes* in cold-smoked and warm-smoked rainbow trout // *Applied Sciences-Basel*. 2023. V. 13(6). p. 3735. <https://doi.org/10.3390/app13063735>

37. González-Alonso, V., Cappelletti, M., Bertolini, F.M., Lomolino, G., Zambon, A. & Spilimbergo, S. Research note: microbial inactivation of raw chicken meat by supercritical carbon dioxide treatment alone and in combination with fresh culinary herbs // *Poultry Science*. 2020.V. 99. pp. 536–545. <https://doi.org/10.3382/ps/pez563>

38. Jauhar, S., Ismail Fitry, M.R., Chong, G.H., Nor-Khaizura, M.A. & Ibadullah, W.Z.W. Different pressures, low temperature, and short-duration supercritical carbon dioxide treatments: microbiological, physicochemical, microstructural, and sensorial attributes of chill-stored chicken meat // *Applied Sciences-Basel*. 2020.V. 10(19). p. 6629. <https://doi.org/10.3390/app10196629>

39. Karki, R., Oey, I., Bremer, P., Leong, S.Y. & Silcock, P. Effect of chilled storage on the quality, in-vitro protein digestibility, and microbial growth of sous vide processed beef short ribs pre-treated with pulsed electric field (PEF) // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2023. V. 89.p. 103485 <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103485>

40. Haughton, P.N., Lyng, J.G., Cronin, D.A., Morgan, D.J., Fanning, S. & Whyte, P. Efficacy of pulsed electric fields for the inactivation of indicator microorganisms and foodborne pathogens in liquids and raw chicken // *Food Control*. 2012. V. 25. pp. 131–135. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2011.10.030>

41. Bhat, Z.F., Morton, J.D., Mason, S.L. & Bekhit, A. The application of pulsed electric field as a sodium reducing strategy for meat products // *Food*

Chemistry. 2020.V. 306. p. 125622 <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125622>

42. Lan, W., Shao, Z., Lang, A. & Xie, J. Effects of slightly acidic electrolyzed water combined with ϵ -polylysine-chitooligosaccharide Maillard reaction products treatment on the quality of vacuum packaged sea bass (*Lateolabrax japonicus*) // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024.V. 260. p. 129554 <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129554>

43. Li, H.J., Bai, X., Li, Y. et al. The positive contribution of ultrasound technology in muscle food key processing and its mechanism—a review // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2022. V. 64. pp. 5220–5241.

<https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2153239>

44. Li, F.F., Zhong, Q., Kong, B.H. et al. Synergistic effect and disinfection mechanism of combined treatment with ultrasound and slightly acidic electrolyzed water and associated preservation of mirror carp (*Cyprinus carpio* L.) during refrigeration storage // *Food Chemistry*. 2022. V. 386.p. 132858 <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132858>

45. Baptista, E., Borges, A., Aymerich, T. et al. Pulsed light application for campylobacter control on poultry meat and its effect on colour and volatile profile // *Food*. 2022. V. 11.p. 2848 <https://doi.org/10.3390/foods11182848>

46. Duma Kocan, P., Rudy, M., Gil, M. et al. The impact of a pulsed light stream on the quality and durability of the cold-stored longissimus dorsal muscle of pigs // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2023. V. 20.p. 4063 <https://doi.org/10.3390/ijerph20054063>

47. McLeod, A., Liland, K.H., Haugen, J.E. et al. Chicken fillets subjected to UV-C and pulsed UV light: reduction of pathogenic and spoilage bacteria, and changes in sensory quality // *Journal of Food Safety*. 2018.V. 38. e12421 <https://doi.org/10.1111/jfs.12421>

48. Roobab, U., Madni, G.M., Ranjha, M. et al. Applications of water activated by ozone, electrolysis, or gas plasma for microbial decontamination of raw and processed meat // *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2023.V. 7. p. 1007679 <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1007679>

49. Oliinychenko, Y.K., Ekonomou, S.I., Tiwari, B.K. & Stratakis, A.C. Assessing the effects of cold atmospheric plasma on the natural microbiota and quality of pork during storage // *Food*. 2024.V. 13. p. 1015 <https://doi.org/10.3390/foods13071015>

50. Rahman, M., Hasan, M.S., Islam, R. et al. Plasma-activated water for food safety and quality: a review of recent developments // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. V. 19.p. 6630 <https://doi.org/10.3390/ijerph19116630>

51. Abdo, A., McWhorter, A., Hasse, D., Schmitt-John, T. & Richter, K. Efficacy of plasma-treated water against *Salmonella typhimurium*: antibacterial activity, inhibition of invasion, and biofilm disruption // *Antibiotics-Basel*. 2023.V. 12(9). p. 1371 <https://doi.org/10.3390/antibiotics12091371>

52. Hu, J., Chen, J., Zheng, Y. et al. Effect of atmospheric cold plasma treatment modes on the quality of red shrimp (*Solenocera crassicornis*) during cold

chain storage // LWT- Food Science and Technology. 2023.V. 190. p. 115543
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115543>

53. Xu, H., Zhu, Y., Yu, B. et al. Comparative analysis of helium and air surface micro-discharge plasma treatment on the microbial reduction and quality attributes of beef slices // Meat Science. 2023.V. 204. p. 109259
<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2023.109259>

54. Zhu, Y.Y., Zhang, M., Mujumdar, A.S. & Liu, Y.P. Application advantages of new non-thermal technology in juice browning control: a comprehensive review // Food Reviews International. 2023. V.39.pp.

4102–4123

<https://doi.org/10.1080/87559129.2021.2021419>

55. Neokleous, I., Tarapata, J. & Papademas, P. Non-thermal processing Technologies for Dairy Products: their effect on safety and quality characteristics // Frontiers in Sustainable Food Systems. 2022.V. 6. p. 856199 <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.856199>

56. Khalid, W., Maggiolino, A., Kour, J. et al. Dynamic alterations in protein, sensory, chemical, and oxidative properties occurring in meat during thermal and non-thermal processing techniques: a comprehensive review // Frontiers in Nutrition. 2023.V. 9. p. 1057457
<https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1057457>