https://doi.org/10.36107/hfb.2024.i2.s217

УДК: [663+664]::53.09

Применение обработки низкотемпературной плазмой в пищевых производствах для интенсификации технологических процессов и повышения качества продукции

Д.В. Карпенко, А.Г. Гришин

Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Москва, Россия

Корреспонденция:
Карпенко Дмитрий Валерьевич,
Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ),
125080, Россия, г. Москва,
Волоколамское шоссе, 11
E-mail: KarpenkoDV@mgupp.ru

Конфликт интересов:
авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

Поступила: 15.05.2024

Поступила после рецензирования: 11.08.2024

Принята: 12.08.2024

Copyright: © 2024 Авторы

АННОТАЦИЯ

Введение. Интенсификация технологических процессов является актуальной задачей в пищевых производствах. Одним из способов ее решения является применение прогрессивных приемов, в том числе, базирующихся на обработке низкотемпературной плазмой. Анализ публикаций, посвященных данному технологическому приему, позволил выявить спектр проблем, которые могут быть устранены за счет воздействия холодной плазмой, показать преимущества и ограничения этого метода.

Цель. Анализ информации о целях, режимах и результатах применения прямого и опосредованного воздействия атмосферной плазмой на объекты и процессы пищевых производств.

Материалы и методы. При подготовке обзора использовали рецензируемые статьи, опубликованные в период с 2001 по 2023 год на английском языке. Была проанализирована информация 128 источников в изданиях, индексируемых в зарубежных и отечественных базах данных Scopus, Web of Science, eLibrary (РИНЦ), в социальной сети ResearchGate, архивах журналов Innovative Food Science & Emerging Technologies, Journal of the Institute of Brewing, Applied Biochemistry and Microbiology, Kvasny prumysl, Foods and raw materials, Хранение и переработка сельхозсырья, Пиво и напитки, Вестник ВГУИТ, Вестник биотехнологии и физико-химической биологии имени Ю. А. Овчинникова. На базе первичного анализа по ключевым словам были отобраны 74 источника для дальнейшего детального исследования.

Результаты. Анализ информации позволил заключить, что применение низкотемпературной плазмы является многофакторным воздействием на обрабатываемые объекты, так как плазма является не только ионизированным газом, но и источником ультрафиолетового излучения, тепла и электрически заряженных частиц. Изучаемый способ воздействия позволяет подавлять нежелательную грибную и бактериальную микрофлору и даже вирусы, интенсифицировать экстракцию целевых компонентов сырья, инактивировать нежелательные ферменты и, напротив, повышать активности нужных биокатализаторов, улучшать функционально-технологические свойства сырья, полупродуктов и их отдельных компонентов, снижать содержание микотоксинов. Отмечены существующие ограничения применения атмосферной плазмой, обусловленные недостатком информации о вызываемых ею изменениях химического состава пищевого продукта и его органолептических характеристик, потенциальным накоплением ксенобиотиков в результате разрушения микробных клеток, а также отсутствием единого принципа разработки устройств для генерации плазмы и параметров ее применения.

Выводы. Обработка низкотемпературной плазмой может быть эффективным инструментом решения широкого спектра задач в пищевых технологиях, однако для ее внедрения в индустриальном масштабе требуется отработка режимов ее проведения, применение рационального оборудования и доказательства отсутствия негативных последствий применения такого приема в рамках конкретной технологии.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

интенсификация технологических процессов пищевых производств, низкотемпературная плазма, холодная плазма, атмосферная плазма, обработка плазмой

Для цитирования: Карпенко, Д. В., & Гришин, А. Г. (2024). Применение обработки низкотемпературной плазмой в пищевых производствах для интенсификации технологических процессов и повышения качества продукции. *Health, Food & Biotechnology, 6*(2), 27–41. https://doi.org/10.36107/hfb.2024.i2.s217

BIOTECHNOLOGY

https://doi.org/10.36107/hfb.2024.i2.s217

Application of Low-Temperature Plasma Treatment in Food Production to Intensify Technological Processes and Improve Product Quality

Dmitry V. Karpenko, Artem G. Grishin

Russian Biotechnological University (BIOTECH University), Moscow, Russia

Correspondence:
Dmitry V. Karpenko,
Russian Biotechnological University,
11, Volokolamskoe highway,
Moscow, 125080, Russia
E-mail: KarpenkoDV@mgupp.ru

Declaration of competing interest: none declared.

Received: 15.05.2024
Received in revised form: 11.08.2024
Accepted: 12.08.2024

Copyright: © 2024 The Authors

ABSTRACT

Introduction. Intensification of technological processes is an urgent task in food production. One of the ways to solve this problem is to use progressive techniques, including those based on low-temperature plasma treatment. An analysis of publications devoted to this technological technique made it possible to identify a range of problems that can be eliminated by exposure to cold plasma and to show the advantages and limitations of this method.

Purpose. Analysis of information on the purposes, modes and results of the use of direct and indirect treatment by atmospheric plasma on objects and processes of food production.

Materials and Methods. To prepare the review, we used peer-reviewed articles published between 2001 and 2023 in English. Information from 128 sources was analyzed in publications indexed in foreign and domestic databases Scopus, Web of Science, eLibrary (RISC), in the ResearchGate social network, archives of the journals Innovative Food Science & Emerging Technologies, Journal of the Institute of Brewing, Applied Biochemistry and Microbiology, Kvasny prumysl, Foods and raw materials, Storage and processing of agricultural raw materials, Beer and drinks, VSUIT Bulletin, Bulletin of biotechnology and physical and chemical biology named after Yu. A. Ovchinnikov. Based on the primary analysis, 74 sources were selected using keywords for further detailed research.

Results. Analysis of the information allowed us to conclude that the use of low-temperature plasma is a multifactorial effect on the objects being processed, since plasma is not only an ionized gas, but also a source of ultraviolet radiation, heat and electrically charged particles. The studied method of influence makes it possible to suppress undesirable fungal and bacterial microflora and even viruses, intensify the extraction of target components of raw materials, inactivate undesirable enzymes and, on the contrary, increase the activity of the necessary biocatalysts, improve the functional and technological properties of raw materials, intermediates and their individual components, and reduce the content of mycotoxins. The existing limitations of the use of atmospheric plasma are noted, due to the lack of information about the changes it causes in the chemical composition of the food product and its organoleptic characteristics, the potential accumulation of xenobiotics as a result of the destruction of microbial cells, as well as the lack of a unified principle for the development of devices for generating plasma and parameters for its use.

Conclusions. Low-temperature plasma treatment can be an effective tool for solving a wide range of problems in food technology, but its implementation on an industrial scale requires development of its implementation modes, the use of rational equipment and proof of the absence of negative consequences of using such a technique within a specific technology.

KEYWORDS

technological processes of food productions intensification, low-temperature plasma, cold plasma, atmospheric plasma, plasma treatment

To cite: Karpenko, D.V., & Grishin, A. G. (2024). Application of low-temperature plasma treatment in food production to intensify technological processes and improve product quality. *Health, Food & Biotechnology, 6*(2), 27–41. https://doi.org/10.36107/hfb.2024.i2.s217

ВВЕДЕНИЕ

Современное пищевое предприятие решает широкий спектр зачастую взаимоисключающих задач: обеспечение необходимого качества и безопасности готовой продукции, ее высокой привлекательности для потребителя в условиях жесткой конкуренции, соблюдение экологических нормативов, в том числе, за счет повышения глубины переработки сырья, достижение заданных уровней себестоимости продукции и рентабельности производства. Во многих отраслях пищевой промышленности традиционные технологии, отработанные на протяжении столетий и даже тысячелетий и не предполагающие применение воздействий обсуждаемого типа, уже не способны гарантировать успешное решение перечисленных задач. Это вызывает необходимость разработки и внедрения нетрадиционных подходов, включающих применение новых, эффективных и экономически обоснованных способов обработки сырья, полупродуктов и готовой продукции. Одним из таких подходов является применение обработки низкотемпературной плазмой на определенном этапе того или иного производства.

Основной целью наших исследований являлся анализ информации о целях, режимах и результатах применения воздействий волн и полей различной природы на объекты и процессы пищевых производств, однако при работе с источниками был выявлен большой интерес к использованию низкотемпературной (холодной) плазмы как эффективного средства решения широкого спектра технологических задач в разных отраслях пищевой промышленности. Плазма как таковая не является волной или полем, хотя и тесно связана с некоторыми из них, поэтому было принято решение подготовить отдельный обзор, посвященный такому принципу обработки. Пока он не имеет широкого практического внедрения, однако, по нашему мнению, является перспективной альтернативой как индустриально применяемым в пищевой промышленности, так и исследуемым способам воздействия волнами и полями.

В силу этого была поставлена задача сбора и анализа литературной информации о спектре технологических задач, которые могут быть решены за счет применения низкотемпературной (холодной) плазмы в различных отраслях пищевых производств, о режимах проведения обработки такого типа, ее преимуществах и недостатках. По нашему мнению, это позволит исследователям, работающим в данной области, обоснованно определять перспективные для изучения способы интенсификации процессов в пищевых производствах.

МЕТОДОЛОГИЯ

Материалы

Объектами анализа были публикации на английском и русском языках, однако релевантных работ на русском языке по тематике обзора с учетом ключевых слов обнаружено не было. Материалами для подготовки обзора являлись публикации в изданиях, индексируемых в базах данных Scopus, Web of Science, социальной сети ResearchGate, электронной библиотеке eLibrary (РИНЦ), из архивов журналов Innovative Food Science & Emerging Technologies, Journal of the Institute of Brewing, Applied Biochemistry and Microbiology, Kvasny prumysl, Foods and raw materials, Хранение и переработка сельхозсырья, Пиво и напитки, Вестник ВГУИТ, Вестник биотехнологии и физико-химической биологии имени Ю. А. Овчинникова, а также из библиографических пристатейных списков статей, обнаруженных ранее. Глубина поиска составляла 60 лет, однако самая ранняя из обнаруженных по теме исследования публикация датируется 2001 годом. Предпочтение отдавалось статьям в журналах МБД Web of Science и Scopus, квартили Q1 и Q2. Количество цитирований не принималось во внимание, так как многие процитированные статьи опубликованы в 2022–2023 годах.

Процедура исследования

На первом этапе по ключевым словам «интенсификация технологических процессов пищевых производств», «низкотемпературная плазма», «холодная плазма», «атмосферная плазма», «обработка плазмой» выявляли публикации за последние 60 лет в изданиях, индексируемых в БД Scopus и WoS и относящихся к квартилям Q1 и Q2. На втором этапе анализировали публикации из пристатейных списков литературы работ, отобранных нами ранее. Далее из рассмотрения исключали публикации, содержание которых дублировалось в другом источнике. В результате были отобраны 74 публикации. Их информацию структурировали в зависимости от целей проведения обработки низкотемпературной плазмой, включая примеры ее непрямого использования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Низкотемпературная плазма — частично ионизованный газ, состоящий из нейтральных атомов и молекул и заряженных частиц (ионов и электронов) (Bartoš et al., 2017). Плазма является источником многих частиц с высокой реакционной способностью: активных форм кислорода, атомарного кислорода (O), озона (O_3), гидроксильных радикалов (OH•) форм азота (N_2, NO, NO_2, радикалы оксида азота NO•) (Bußler et al., 2015). Кон-

центрации этих частицы в рабочем газе могут быть поддерживаться на заданном уровне в зависимости от решаемой задачи посредством введения в него тех или иных газообразных примесей. Помимо этого, плазма является источником ультрафиолетового излучения спектров УФ-А и УФ-В, которые эффективно используются для стерилизации медицинских инструментов и приборов. Еще одним фактором, обуславливающим потенциальную эффективность применения холодной плазмы, является следующий: плазменный разряд может быть использован в качестве источника тепла или интенсивного потока электрически заряженных частиц (Bermudez-Aguirre, Wemlinger, Pedrow, Barbosa-Cánovas, & Garcia-Perez, 2013). Экспериментально установлено, что влажность воздуха также влияет на окислительную способность плазменного разряда ввиду образования перекиси водорода и пероксиазотистой кислоты/пероксинитрита, механизм антимикробного действия которых очень похож на таковой у активных форм кислорода (Naïtali, Herry, Hnatiuc, Kamgang, & Brisset, 2012). Сконструировано множество устройств, генерирующих плазменные разряды, работающих в различных режимах (Bu et al., 2023). Однако это разнообразие и сложность плазмы как системы сделали сравнение их эффективности практически невозможным (Bartoš et al., 2017). Несмотря на упомянутый широкий спектр различных видов оборудования для генерации плазмы, предпочтение отдается работающим при атмосферном давлении из-за более легкого их использования в производственной практике (Ziuzina, Patil, Cullen, Keener, & Bourke, 2014; Baier et al., 2013).

Применение низкотемпературной плазмы для подавления нежелательной[1] микрофлоры

Пищевые отравления даже в развитых странах часто связаны с употреблением продуктов, инфицированных патогенными микроорганизмами. Последние становятся более устойчивыми к традиционным методам дезинфекции; кроме того, многие потребители отдают предпочтение продуктам, не содержащим химикатов (Bermudez-Aguirre, Wemlinger, Pedrow, Barbosa-Cánovas, & Garcia-Perez, 2013), в том числе, применяемых для подавления патогенной микрофлоры. Значительное количество публикаций посвящено оценке эффективности обработки холодной плазмой с целью подавления развития нежелательных грибных (Molina-Hernandez, et al., 2023) и бактериальных культур (Sudarsan, & Keener, 2022; Wang, Z., et al., 2023; Zhao, et al., 2023). Основной действующей силой плазменной стерилизации являются УФ-излучения и частицы с высокой реакционной способностью (Moisan et al., 2001). Экспериментальные данные позволяют предположить, что основную роль в подавлении нежелательных микроорганизмов играют молекулы кислорода и азота. Высказано мнение, что чистая холодная азотная плазма имеет низкую антимикробную эффективность по отношению к бактериям *Salmonella enteritidis* и *Salmonella typhimurium*, инокулированным на поверхность яичной скорлупы, однако приводятся и противоположные данные (Ragni et al., 2010; Illera, Souza, Nikmaram, Tang, & Keener, 2022), свидетельствующие о значительном снижении численности этих бактерий при использовании разрядов, образующихся в воздухе.

Апробирована (Maeda, Toyokawa, Shimizu, Imanishi, & Sakudo, 2015) инактивация клеток бактерий рода *Salmonella* азотной плазмой, генерируемой статической индукцией. После обработки плазмой в течение 5 и более минут жизнеспособные клетки не обнаруживались. Причиной этого были повреждения внешних клеточных структур и геномной ДНК бактерий. Исследован механизм эффективной инактивации холодной атмосферной плазмой бактерий *Pseudomonas aeruginosa* (Zhao, Y., et al., 2022).

Установлена (Lee et al., 2011) целесообразность применения холодной плазмы различных газовых смесей для инактивации *Listeria monocytogenes* на агаре, поверхности мяса и нарезанной курице. Значительное снижение числа клеток бактерий обеспечивала обработка в течение 2 мин, при этом максимальную эффективность продемонстрировала смесь азота и кислорода.

Доказана (Ehlbeck et al., 2015) высокая эффективность применения воздушной плазмы для инактивации различных бактерий (*Bacillus atropaeus*, *Escherichia coli*, *Listeria innocua*, *Pectobacterium carotovorum*, *Pseudomonas marginalis* и *Staphylococcus aureus*). После 15 мин воздействия количество выживших бактерий всех перечисленных родов снижалось ниже предела обнаружения.

Проведена (Tappi et al., 2023) оценка влияния обработки холодной атмосферной плазмой (поверхностным диэлектрическим барьерным разрядом) с различными газовыми смесями (80 % Ar/20 % O_2 или 80 % N_2/20 % O_2) на обеззараживание инокулированных возбудителей (*E. coli* и *L. innocua*; 10^4 КОЕ/г инокулята) и эндогенной микробиоты порчи, а также на основные показатели качества филе морского леща (*Spaurus aurata*). Оно оценивалось по перевариваемости in vitro, биодоступности жирных кислот и степени гидролиза белков. Установ-

[1] Причины «нежелательности» могут отличаться в зависимости от конкретной технологии/производства. Это могут быть патогенные м/о, «м/о порчи», м/о, ухудшающие/изменяющие желаемые органолептические характеристики готового продукта. В любом из этих случаев их, по нашему мнению, можно именовать «нежелательными».

лено, что такая обработка в течение 20 мин привела к снижению бактериальной нагрузки в свежем филе морского леща до 10 КОЕ/г при использовании газовой смеси Ar/O_2, в течение 20 мин; продолжительность воздействия была более значимым фактором, чем состав газовой смеси. Наблюдалось незначительное увеличение окисления липидов (от 0,5 мг МДА/кг до 4 мг МДА/кг), но, по мнению авторов, на усвояемость продукта это не повлияло.

Испытаны (Ricciardi, Del Nobile, Conte, Fracassi, & Sardella, 2022) как прямая, так и непрямая обработка плазмой кустарной рикотты[2], обеспечившие увеличению срока хранения этого скоропортящегося продукта на 2 дня, при этом его органолептические характеристики сохранялись на уровне контрольных. По мнению авторов, обработка данного типа может быть привлекательна для свежих сыров ввиду простоты реализации, проведения при комнатной температуре и безопасности для окружающей среды.

Изучено (Hou et al., 2023) влияние холодной плазмы диэлектрического барьерного разряда на образование биопленки дрожжей *Pichia manshurica*. После обработки плазмой (80 кВ, 50 Гц) в течение 4,5 мин и 7,5 мин количество жизнеспособных клеток уменьшилось на 2 и 5 порядков, соответственно, а скорость биопленкообразования снизилась на 73 % и 48 % по сравнению с контролем. Воздействие плазмы вызывало значительные повреждения на морфологическом уровне, нарушение проницаемости клеточных мембран и метаболические изменения. Были разрушены ряд путей метаболизма аминокислот, цикл трикарбоновых кислот и синтез полимерных веществ.

В лабораторных условиях опробованы разряды, генерируемые не в различных смесях кислорода и азота, а в других газах, но их практическое использование вызывает ряд вопросов. Сообщается (Song et al., 2009), что инактивирующее действие разряда мощностью 150 Вт в гелии сильно зависело от типа пищевого продукта, инфицированного клетками *Listeria*: их титр снижался более, чем на 8 порядков при обработке нарезанного сыра, но в нарезанной ветчине он снижался незначительно, не более, чем вдвое. Важное значение наличия кислорода в рабочем газе подтверждено при приведении исследований с бактериями родов и видов *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli* и *Salmonella typhimurium*, посеянными на бекон: проведено сравнение эффективности двух разных рабочих газовых сред (чистого гелия и смеси гелия и малых количество кислорода), показавшее, что кислород существенно повышал эффективность обработки холодной плазмой (Kim et al., 2011).

Интересной представляется информация (Velebit, et. al., 2022) об эффективности применения холодной атмосферной плазмы для инактивации вирусов (мышиного норовируса (МН) и вируса гепатита (ВГ)) на ягодах малины сорта Willamette, которую инокулировали аэрозолем вирусов. Для генерации плазмы использовали импульсный положительный коронный разряд. Ягоды обрабатывали в течение 1, 3, 5, 7 и 10 минут при мощности 25 Вт. Воздействие холодной плазмы позволило снизить количество вирусных единиц на 4 порядка менее чем за 5 минут для МН и примерно за 10 минут для ВГ (от начальных уровней 6,91 и 7,84 $\log_{10}$ вирусных единиц/см^3, соответственно). Обработка не привела к существенному ухудшению цвета ягод как важного показателя качества.

Бактерицидное действие холодной плазмы может быть использовано при упаковке пищевых продуктов. Технология может быть использована для стерилизации как упакованного продукта, так и самого упаковочного материала. Так, доказана возможность снижения количества клеток бактерий *Bacillus cereus*, *Bacillus subtilis* и *Escherichia coli*, инокулированных на коричневый рис, примерно на 2 порядка при воздействии холодной низкочастотной плазмой, генерируемой в атмосферном воздухе в пластиковом контейнере с образцами (Lee et al., 2016). Интересные данные получены при изучении непрямого воздействия холодной плазмы (Rød, Hansen, Leipold, & Knøchel, 2012): оно обеспечило снижения количества жизнеспособных клеток *Listeria innocua* на поверхности готового к употреблению мясного продукта (брезаолы) внутри герметичных полиэтиленовых пакетов. Сообщается, окисление липидов после такой обработке оставалось ниже порога обнаружения.

В рамках аналогичного подхода изучалось (Jeon, Lee, & Min, 2023) влияние обработки холодной плазмой разряда атмосферного диэлектрического барьера на антимикробную эффективность упаковки (оболочки) из изолята сывороточного белка, содержащей яблочную кислоту, и на диффузию яблочной кислоты в обработанное мясо куриной грудки без кожи. Такая упаковка с последующей обработкой холодной плазмой снижало количество клеток сальмонеллы примерно на 2 порядка. Воздействие холодной плазмы увеличило скорость снижения количества клеток сальмонеллы в упакованных образцах в процессе хранения при 4 и 10° С, а также повысило коэффициент диффузии яблочной кислоты в оболочке, не влияя на цвет и степень окисление липидов куриного мяса при хранении при 4°С, а также на паропроницаемость и модуль упругости самой оболочки.

[2] Речь идет о продукте «рикоттта» (традиционный итальянский сывороточный сыр), произведенном кустарным способом, а не на индустриальном предприятии.

Обеспечение асептических условий технологического процесса, в том числе, рабочих поверхностей оборудования, контактирующих с сырьем и полупродуктами, является важнейшим условием обеспечения необходимого качества и безопасности пищевой продукции. Проведена оценка (Wang, Lavoine, & Salvi, 2023) эффективности воздействия холодной плазмы атмосферного давления для инактивации адгезивных клеток и биопленок *Escherichia coli* DH5α на двух материалах конвейерной ленты. Воздействие в течение 120 с на расстоянии 3 см от поверхности уменьшило количество как прикрепившихся клеток, так и компонентов 24-часовых биопленок на нержавеющей стали примерно на 5 порядков, а на поливинилхлориде — на 3,5 порядка, соответственно. Зрелые биопленки (выращенные в течение 72 часов) были более устойчивыми, чем 24-часовые биопленки, выращенные в течение 24 часов. На поцарапанных поверхностях наблюдалось меньшее снижение микробов по сравнению с неповрежденными. Никаких изменений химических свойств и визуальной топографии поверхностей из нержавеющей стали и ПВХ после обработки плазмой не зафиксировано. Непрерывная обработка холодной атмосферной плазмой рабочих поверхностей оборудования пищевых предприятий рекомендована и в работах (Katsigiannis, et al., 2022; Souza, Illera, Keener, 2022).

Аналогичный прием реализован в исследовании (Perni, Liu, Shama, & Kong, 2008), посвященном оценке результативности инактивации холодной атмосферной плазмой патогенов и микроорганизмов, вызывающих порчу манго и дынь. Вначале было установлено рабочее напряжение, необходимое для эффективного обеззараживания фруктов, для чего использовали *Escherichia coli* (10^7 КОЕ/см^2 на поверхности манго). При напряжении 16 кВ наблюдалось уменьшение количества клеток на 3 порядка на всех трех использованных средах. Дальнейшие исследования при установленных режимах проводили с использованием *Saccharomyces cerevisae*, *Pantoea agglomerans* и *Gluconacetobacter liquefaciens*, число клеток которых на поверхности околоплодников манго и дыни составляло 10^6 КОЕ/см^2. Количество клеток *P. agglomerans* и *G. liquefaciens* снижалось ниже предела обнаружения уже через 2,5 с на обоих плодах, тогда как в случае *E. coli* на это потребовалось 5 с. *S. cerevisae* были наиболее устойчивыми из изученных микроорганизмом: численность их клеток сократилась ниже предела обнаружения через 10 с на манго и через 30 с на дыне. Показано, что повышение приложенного напряжения привело к более эффективному производству реактивных частиц плазмы, особенно атомов кислорода, что, в свою очередь, повысило эффективность инактивации микроорганизмов.

Изучено (Kim, Lee, Lee, & Yoon, 2022) влияние плазмы диэлектрического барьерного разряда (ДБР) на уровни *Eshcericah coli* O157:H7 и *Bacillus cereus* в порошке красного перца, а также физико-химические свойства последнего при хранении при 25 °C. Порошок, инокулированный *E. coli* O157:H7 и *B. cereus*, обрабатывали плазмой ДБР с использованием аргона в качестве плазмообразующего газа при мощности 31 кВт в течение 0, 5, 10 и 15 мин. Показано, что такая обработка повреждает мембраны бактериальных клеток, что приводит к их гибели. Физико-химические свойства порошка красного перца не изменились в течение месяца после обработки. Авторы рекомендуют обработку плазмой ДБР в течение 15 минут для контроля патогенов пищевого происхождения в порошке красного перца без изменения его физико-химических свойств.

Многие аспекты воздействия холодной плазмы и механизм ее фунгицидной активности детально изучены в лабораторном масштабе (Molina-Hernandez, et. al., 2022), однако применение такого рода обработки в промышленном масштабе достаточно ограничено, так как ряд вопросов еще не решен. Так, требуется установить, какие вещества образуются при разложении микотоксинов и других химических соединений. Они могут быть даже более опасны, чем исходные микотоксины. Также необходимо выяснить, выделяются ли в пищевые продукты некоторые микотоксины при воздействии плазмы на микроскопические грибы и разрушения клеток последних. Важной проблемой является и масштабирование процесса обработки плазмой до индустриального уровня, в том числе, и из-за большого разнообразия используемых устройств и параметров процесса, отмеченных выше.

Использование плазменных технологий в пищевой промышленности целесообразно только в том случае, если органолептические характеристики продуктов питания (вкус, аромат и цвет), их химический состав и пищевая ценность не ухудшаться после обработки. В литературе приводится большое количество данных, которые свидетельствуют о сохранении показателей качества и безопасности свежих фруктов и овощей (Ramos, Miller, Brandão, Teixeira, & Silva, 2013), не допускающих грубых и интенсивных воздействий, например, клубники (Misra, Patil et al., 2014), томатов черри (Misra, Keener, Bourke, Mosnier, & Cullen, 2014). Приводятся данные о минимальных изменениях пищевой ценности орехов (Amini, & Ghoranneviss, 2016), семян пшеницы и тритикале (Kříž et al., 2015) в результате обработки плазмой в рациональных режимах. Обеззараживание яиц в скорлупе, зараженных *Salmonela enteritidis* и *Salmonella typhimurium*, не оказали существенного негативного воздействия даже при длительной обработке (до 90 мин) плазменными разрядами (Ragni et al., 2010). Установлено (Wang, Zhuang, Hinton, & Zhang, 2016), что обсуждаемый тип обработки не вызывает каких-либо существенных изменений в цвете поверхности и, как следствие, во внеш-

нем виде свежего филе куриной грудки, но существенно увеличивает микробиологическую стойкость продукта и срок его хранения.

Однако имеется достаточное количество экспериментальны данных, свидетельствующих о негативных последствиях плазменной обработки. Так, выявлено (Pasquali et al., 2016) эффективное снижение обсемененности бактериями *Listeria monocytogenes* и *Escherichia coli* листьев красного цикория под действием холодной плазмы; при этом, хотя непосредственно после обработки качество продукта оставалось неизменным, уже спустя сутки хранения фиксировались существенные изменения его внешнего вида по сравнению с контрольным вариантом. Аналогичные выводы сделаны (Baier et al., 2014) после изучения результатов воздействия холодной плазмы на салат, огурцы, яблоки и помидоры, которые показали, что такой тип обработки не обеспечивает сохранения должного качества этих продуктом; следует отметить, что такой вывод противоречит упомянутому выше мнению другой группы исследователей (Ramos, Miller, Brandão, Teixeira, & Silva, 2013). Показано, что плазменная обработка иногда приводит к изменению цвета пищевых продуктов; в частности, зафиксировано (Bursać Kovačević et al., 2016) изменение цвета гранатового сока при одновременном увеличении содержания в нем антоцианов с 21 до 35 %; отмечена также потеря пигментации киви (Ramazzina et al., 2015).

Помимо изменений цвета некоторые источники сообщают об ухудшении физических и химических параметров после обработки: существенном снижении твердости зерен коричневого риса (Lee et al., 2016), снижении прочности на разрыв и влагобарьерных свойств обезжиренной пищевой пленки на основе соевого шрота, используемой для хранения копченого лосося (Oh, Roh, & Min, 2016), уменьшение содержания свободных жирных кислот и фосфолипидного комплекса пшеничной муки (Bahrami et al., 2016).

Еще одной характеристикой пищевых продуктов, которая может разнонаправленно изменяться в результате обработки холодной плазмой является их антиоксидантной активности. В частности, в коричневом рисе она повышалась в результате такого воздействия (Bartoš et al., 2017; Lee et al., 2016), практически не изменялась в плодах киви (Ramazzina et al., 2015), тогда как в свеженарезанных яблоках незначительно возрастала после 5-минутной обработки, но при более длительном действии холодной плазмы снижалась примерно на 30 % по сравнению с контролем (Tappi et al., 2018).

Низкотемпературная плазма как средство интенсификации технологических процессов и улучшения характеристик и безопасности сырья и готовой продукции пищевых производств

Высказано мнение (Li, Li, Ma, & Zhou, 2023), что экономическая ценность жимолости невелика из-за трудности сбора урожая, хранения и транспортировки, а также из-за кислого вкуса. Однако она может быть сырьем для экстрагирования антоцианов. Изучена возможность интенсификации экстракции антоцианов жимолость за счет предварительной обработки холодной плазмой при различной мощности (0, 100, 200, 300 Вт) на основании определения выхода сухих веществ, состава мономеров и антиоксидантной способности экстракта. Установлено, что предварительная обработка холодной плазмой разрушает компоненты клеточных стенок жимолости, увеличивает шероховатость поверхности последних, повышает ее гидрофильность, улучшает ее гидратационные свойства и модифицирует ее ферментативную активность. В результате значительно возросли степень экстракции антоцианов (на 13,35–20,47 %), содержание мономеров антоцианов и антиоксидантная активность экстрактов. Кроме того, предлагаемый способ является более экологически безопасным, чем традиционные.

Предложена (Kumar, Pipliya, & Srivastav, 2023) обработка термической и холодной плазмой с целью инактивации полифенолоксидазы и пероксидазы в соке киви. Показано, что по сравнению с термической обработкой, обработка холодной плазмой эффективно сохраняет биохимические свойства сока.

Изучена возможность применения плазмы в производстве продуктов с низкой усвояемостью. Для этого модификацию пшеничного крахмала проводили с помощью α-амилазы и последующего воздействия плазмой, что обеспечило снижение молекулярной массы, число боковых цепей в амилопектине, кристалличности, силы набухания и вязкости пасты. Напротив, повысились температура клейстеризации и резистентность крахмала (Shen, et al., 2022).

Иные изменения, но также с целью улучшения функциональных свойств достигнуты за счет обработки холодной плазмой атмосферного давления муки из семян джекфрута (индийского хлебного дерева). Зафиксированы (Joy, Kalaivendan, Eazhumalai, Kahar, & Annapure, 2022) изменения морфологии с увеличением шероховатости поверхности, снижение степени кристалличности (с 25,75 % до 21,31 %) и модификации комплексов крахмал-белка. Они обеспечили увеличение растворимости в воде (с 9,65 до 14,11 г/г), абсорбции (с 6,39 до 7,66 г/г),

способности набухания (с 7,28 до 8,79 г/г). г), водоудерживающей способности (от 2,93 до 3,48 г/г) и сыпучести, снижение pH (с 6,59 до 6,05), влажности (с 8,14 до 5,26 %) и вязкости пасты.

Такой же подход апробирован (Jaddu, Pradhan, & Dwivedi, 2022) применительно к муке из мелких зерен просо для повышения ее ценности. Просяную муку обрабатывали холодной плазмой при двух разных мощностях электрического разряда (13 и 24 Вт) с выдержкой 10 мин, 20 мин и 30 мин. Определяли водо- и маслопоглощающую способности, способность к набуханию, индекс растворимости, наименьшую концентрацию желатинизации, цвет, вязкость, диспергируемость, насыпную и истинную плотность контрольной и обработанной плазмой муки. Показано, что плазменная обработка улучшила функциональные свойства пшенной муки, в то время как ее физические свойства остались неизменными. В микроструктуре пшенной муки выявлен распад гранул крахмала, выявлено снижение относительной кристалличности вследствие деполимеризации крахмала, вызванной действием активных форм кислорода и азота в холодной плазме.

Тонкие листы соевого творога, популярного в Китае пищевого продукта, в основном упаковываются под вакуумом для обеспечения длительного срока годности. Однако это приводит к слипанию листов, которое становится трудно разделять. Для решения этой проблемы был разработан (Yang, Wang et al., 2023) метод быстрой дегидратации листов под действием холодной плазмы.

Показана (Palabiyik, Kopuk, Konar, & Toker, 2023) возможность изменения органолептических и технологических показателей какао (кислотность, горечь, терпкость, растворимость и цвет) обработкой плазменной струей атмосферного давления вместо традиционного подщелачивания, являющегося трудоемким и энергозатратным процессом. Дополнительно предлагаемый способ обеспечивает лучшую сохранность биологически активных соединений (общее содержание фенолов и флавоноидов) в натуральных какао-порошках, требует примерно 65 % меньше времени, исключает необходимость применения химикатов, высокого давления или аэрации. Отмечается, что обработка холодной плазмой не привела к увеличению общей зольности и, следовательно, водоудерживающей способности порошков, в отличие от обычного подщелачивания; вызывала травление поверхности и удаление слоя комплексов белок-полифенол-клеточная стенка, эффективно снизила содержание кислых фракций какао-порошка. Негативными результатами является окисление какао-масла и образование продуктов распада олеиновой и линолевой кислот.

Доказана (Rout, & Srivastav, 2023) возможность структурной модификации белков с помощью холодной плазмы для повышения технологической функциональности соединений этой группы с применением меньшего количества химикатов. Помимо этого, такая обработка обеспечивает инактивацию нежелательных ферментов, аллергенов, продление сроков годности различных пищевых продуктов.

Изучено (Mehta, et al., 2022) влияние холодной плазмы на экстракцию ксилоолигосахаридов (КОС) из рисовых и кукурузных отрубей. Перед экстракцией КОС из отрубей были выделены полифенолы и пищевые волокна. Обработка обсуждаемого типа значительно интенсифицировала экстракцию КОС за счет нарушения исходной микроструктуры отрубей. Кроме того, КОС, извлеченный таким способом, обладали лучшей перевариваемостью в желудке, не проявляли цитотоксичности в отношении клеточных линий RAW 264.7 и HepG2, стимулировали противовоспалительные процессы.

Микроволновая (2,45 ГГц) плазма, подаваемая под высоким отрицательным напряжением, успешно использовалась для частичного гидрирования пальмового олеина с целью производства маргарина с низким содержанием трансжиров при низкой температуре и низком давлении в отсутствие катализатора. Исследовано влияние различных параметров: скорости потока, мощности СВЧ, температуры реакции, отрицательного высокого напряжения и продолжительности реакции на йодное число и кулинарные характеристики гидрогенизированного масла. Выявлены оптимальные параметры: скорость потока 4 дм^3/мин, мощность микроволновой обработки 600 Вт, температура 32 °C (из-за саморазогрева плазмы), отрицательное высокое напряжение 60 кВ и продолжительность реакции 4 часа, обеспечившие йодное число в диапазоне от 57,7 до 32,5. Содержание трансжирных кислот составило 4,23 %, что ниже, чем при обычном каталитическом гидрировании (Wongjaikham, et al., 2022).

По нашему мнению, целесообразно выделить еще одно потенциальное направление применения холодной плазмы в пищевых производствах, а именно, подавление развития популяций плесневых грибов и снижения содержания их метаболитов в продукции пищевых производств. Эти микроорганизмы могут накапливать нежелательные метаболиты — микотоксины, представляющие опасность для здоровья потребителя пищевых продуктов (Nagl & Schatzmayr, 2015). В настоящее время известно более трехсот микотоксинов, из них около двадцати «значимы с токсикологической точки зрения»; некоторые из них обладают комбинированным токсичным воздействием (Bartoš et al., 2017).

Микотоксины присутствуют практически во всех видах зернового сырья пищевых производств, на их концентрацию влияют различные факторы, в том числе,

агротехнические приемы при выращивании культур (Konvalina, et al., 2016) и условия хранения урожая.

Микотоксины термически и химически стабильны; выявлено, что обработка фунгицидами не изменяет их содержание в ячмене (Malachová et al., 2010). Рассматривалась эффективность различных способов снижения содержания этих токсинов в зерне ячменя: промывание горячей водой, подщелачивание, окисление, восстановление, гидролиз, гидратация (Bartoš et al., 2017). Они позволяют снизить концентрацию микотоксинов, но не обеспечивают достаточную безопасность сырья и произведенных из него пищевых продуктов.

В качестве альтернативного подхода было изучено (Amini, & Ghoranneviss, 2016) влияние плазмы на плесневые грибы *Aspergillus flavus*, которые накапливают афлатоксин. Обработка плазменной струей сушеных грецких орехов в течение 10 мин устранила грибок с поверхности орехов. Подтверждена (Dasan, Boyaci, & Mutlu, 2016) эффективность воздействия холодной плазмы для обеззараживания кукурузы. Микрофлора зерен кукурузы, контаминированных спорами *Aspergillus flavus* и *Aspergillus parasiticus* снизилась до уровня ниже детектируемого после 3-минутной обработки. Такая степень обсемененности сохранялась при хранении обработанного образца кукурузы при 25° С в течение 30 суток. Аналогичный подход может быть эффективен для инактивации *A. flavus* и *A. niger* на арахисе как сырье для производства масла, значительно снижая в последнем концентрацию афлатоксина (Lin, C.-M., et al., 2022). Сообщается (Zahoranová et al., 2016), что обработка плазмой обеспечивает значительное снижение количества клеток мицелиальных грибов-продуцентов токсинов, а именно *Fusarium nivale*, *Fusarium culmorum*, *Trichothecium roseum*, *Aspergillus flavus* и *Aspergillus clavatus*, на поверхности искусственно зараженных семян пшеницы.

Сообщается (Zhi et al., 2023) о возможность непосредственного разложения афлотоксинов под действием холодной плазмы диэлектрического барьерного разряда в рисе, обсемененном токсигенными штаммами *Aspergillus*. Опытные образцы были инокулированы и инкубированы для получения различных уровней афлатоксинов. Скорость разложения афлатоксина B1 и общее количество афлатоксинов зависели от влажности зерна, содержания кислорода, времени обработки и напряжения. Обработка приводила к снижению количества афлатоксина B1 в рисе на 1,08–55,34 % в зависимости от условий. Не было обнаружено существенных изменений влажности, содержания белков и амилозы, цвета зерен в результате воздействия плазмы, однако оно усилило окисление жиров и сделало поверхность зерен более гладкой и пористой. Аналогичное мнение (без упоминания о негативных изменениях обрабатываемых продуктов) об эффективном разложении афлатоксинов высказано в работе (Li, Yao, Wang, Tian, & Zhang, 2022).

Одним из пороков пива является так называемый «гашинг-эффект» — явление, заключающееся в одномоментном избыточном пенообразовании при откупоривании потребительской тары (например, бутылки) с пивом. Его причиной является немедленное выделение углекислого газа после открытия бутылки вследствие его выделение на микроскопических «ядрах конденсации» — гидрофобных твердых частицах, основу которых составляют поверхностно-активные белки, так называемые гидрофобины (Běláková et al., 2018). Продуцентами этих белков являются мицелиальные грибы рода *Fusarium*, заражающие зерновые культуры на разных этапах работы с зерном и, по некоторым предположениям, дополнительно развивающиеся в зерновой массе на стадии солодоращения.

Для подавления грибкового поражения зерновых культур перед проращиванием апробированы различные физические методы, некоторые из которых обсуждены в других разделах данного обзора. Недостатком большинства из них является то, что они устраняют лишь признаки грибкового поражения, но не устраняют его полностью; клетки, пережившие такую обработку, способны вновь размножаться в процессе соложения зерна, при этом воздействие не гарантирует сохранения качественных показателей готового солода требуемом уровне.

Было изучено (Bartoš, et al., 2017) влияние обработки ярового ячменя (сорт Франсин) низкотемпературными плазменными разрядами на «гашинг-потенциал» полученного из него солода. Обработку проводили повторными разрядами (от трех до десяти раз) в течение 0,5–2,0 секунд с интервалами, достаточными для охлаждения зерна

Пивоваренный ячмень и солод, полученный из него, подвергали обработке плазмой обработке. В образцах солода определяли «гашинг-потенциал», а также оценивали ряд показателей качества (число Кольбаха, диастатическую силу, содержание β-глюканов в сусле, конечную при разжижении, экстрактивность солода в сухом веществе, разность холодного и горячего экстрактов, хрупкость зерна). «Гашинг-потенциал» значимо снизился в обработанных плазмой образцах солода. Остальные определявшиеся качественные характеристики солода остались на уровне контрольных.

Инактивация ферментов, ухудшающих качество пищевых продуктов по окончании производственного цикла, в частности, при хранении, может осуществляться различными способами. Предложено решение, базирующееся на воздействии холодной плазмы (Andreou

et al., 2023). Показано, что плазменная струя с диэлектрическим барьером, питаемая газообразным гелием, эффективно (на 55–80 % в зависимости от приложенного напряжения, потока гелия и продолжительности) инактивирует пектинметилэстеразу в свежевыжатом апельсиновом соке за короткое время воздействия (2–30 минут). Авторы отмечают, что тепловая «нагрузка» не является основным фактором инактивации пектинметилэстеразы — повышение температуры с 20 до 90° С привело к снижению активности фермента менее, чем на 5 %. Также за счет обработки холодной плазмы возможна инактивация полифенолоксидаза и пероксидазы, ответственных, в том числе, за ферментативное потемнение ломтиков банана — их активность снижалась на 70 и 100 %, соответственно. Помимо этого, зафиксировано увеличение общего содержания фенолов и флавоноидов в опытных образцах, что способствовало увеличению антиоксидантной активности более, чем на 50 %. Наилучшие результаты обработки холодной плазмой были получены при напряжении 6,9 кВ в течение 46 с. Содержание витамина B_6 в оптимальном образце достигало 0,8 мкг/100 г (Khoshkalam Pour, Khorram, Ehsani, Ostadrahimi, & Ghasempour, 2022).

Описан (Wang, T., et al., 2022) и противоположный по смыслу способ применения холодной атмосферной плазмы высокого напряжения (ХАПВН) как новой технологии модификации катализаторов. Катализатор рутений/многослойные углеродные нанотрубки был активирован ХАПВН вместо метода термического восстановления. Установлено, что активация ХАПВН при времени разряда 180 с, мощности разряда 150 Вт и расстояния между электродами 2,5 см при 25° С может эффективно снизить температуру и время активации. Показано, что катализатор, обработанный ХАПВН, не агрегирует и имеет высокую активность. Его применяли для проведения реакции изомеризации сафлорового масла с целью обогащения его конъюгированной линолевой кислотой. Ее содержание составило 43,02 %, содержание транс-олеиновой кислоты — 1,34 %, йодное число — 133,50 г I_2/100 г, а после пятикратного повторного использования относительная активность катализатора осталась на уровне 77 % от исходной.

Непрямое использование низкотемпературной плазмы для решения технологических задач

Сообщается (Xu & Tan, 2023) о возможности косвенного использования атмосферной плазмы. По мнению авторов, активированная плазмой микропузырьковая вода (АПМВ) представляет собой экологически безопасное дезинфицирующее средство, которое обладает мощными противомикробными свойствами и создает значительное напряжение сдвига на поверхностях, контактирующих с пищевыми продуктами. Сравнивали результаты очистки трубок из ПВХ, инокулированных *Klebsiella michiganensis*, с помощью АПМВ, воды, активированной плазмой, воды с микропузырьками и хлорированной (100 мг/см^3) воды. Наиболее сильный противомикробный эффект продемонстрировала именно АПМВ, обеспечив снижение количества бактериальных клеток примерно 3 порядка при скорости потока 1 м/с. Остальные апробированные дезинфектанты обладали примерно одинаковой бактерицидной активностью, снижая титр бактерий примерно на 2 порядка при всех выбранных скоростях потока. Деионизированная вода снизила численность *K. michiganensis* только в 10 раз при скорости потока 1 м/с.

Аналогичный подход предложен для увеличения срока хранения грецких орехов, которые в свежем виде обладают уникальным вкусом и содержат различные биологически активные вещества, но являются скоропортящимся пищевым продуктом «из-за отсутствия практичных и экономически эффективных методов консервации после сбора урожая» (Xiao et al., 2023). Качество свежих ядер грецких орехов, обработанных деионизированной водой, водой, содержащей ClO_2, и активированной плазмой водой (АПВ) в течение 15 минут, контролировали в процессе хранения при температуре 4° С. Результаты показали, что 100-секундная обработка АПВ снизила общее количество жизнеспособных клеток более, чем на порядок. Бактерицидное и бактериостатическое действие АПВ превосходило таковое у раствора ClO_2 концентрацией 4 мг/дм^3. Ядра грецких орехов, обработанные АПВ, сохраняли вкус в течение 12 сут хранения при температуре 4 °С, в то время как в других вариантах посторонние запахи фиксировались уже после 6 сут. Более того, обработка АПВ может предотвратить потерю питательных веществ, потемнение и прогоркание, ингибировать повышение активностей пероксидазы, полифенолоксидазы и липазы. Возможность снижения количества микробных клеток (дрожжей, плесеней, продуцирующих сероводород микробов, молочнокислых бактерий, *Pseudomonas* spp., *Brochotrix thermosphacta* и *Enterobacteriaceae*) на 1,5–3 порядка при сохранении качественных показателей на протяжении 10 сут хранения была показана при изучении эффективности обработки АПВ филе морского леща (Chanioti et al., 2023) и лосося (Zhu, Tan et al., 2023). Еще одной группой объектов, обсемененность которых аэробными мезофильными микроорганизмами и *Escherichia coli* DH5α снижали за счет обработки активированной плазмой водой, являлись ростки люцерны, брокколи и клевера. Апробированная обработка не привела к визуальным изменениям цвета ростков и повреждениями тканей растений (Rivero, Wang, & Salvi, 2022).

В то же время, исследования токсичности воды, обработанной/активированной холодной плазмой, не дают

однозначного ответа о ее полной безопасности, которая зависит от параметров обработки (Katsaros et al., 2023).

Проведена (Wu, Shen, Li, Wu., & Chen, 2022) также оценка влияния иного способа непрямого применения плазмы. Обработанным ею в течение 30, 120 и 240с воздухом (ВОП) воздействовали на *Monilinia fructicola*, патоген желтых персиков «Цзинсю» и оценивали качество фруктов. Установлено, что обработка воздуха в течение 240с обеспечила лучший эффект обеззараживания, снижая количество клеток на 1,67 log10 КОЕ/г сразу после обеззараживания, и более чем на 1,4 log10 КОЕ/г во время хранения. Показано, что обсуждаемый способ обработки вызывал накопление галлокатехина в околоплоднике, и антиоксидантная активность околоплодника также увеличивалась. Кроме того, непрямая обработка плазмой не оказала негативного влияния на общее количество растворимых сухих веществ, твердость и цвет желтых персиков. Сходные результаты — значительное снижение количества жизнеспособных микроорганизмов — получены (Durek, et al., 2022) при воздействии ВОП на сушеные мяту перечную, крапиву двудомную и лемонграсс, при этом отмечено ухудшение цветности и снижение содержания антиоксидантов, фенолов и флавоноидов в травах, которые, по мнению авторов, могут быть уменьшены за счет оптимизации параметров обработки.

ВЫВОДЫ

Низкотемпературная плазма является ионизированным газом, то есть, совокупностью частиц с высокой реакционной способностью; помимо этого, плазменный разряд является источником ультрафиолетового излучения, тепла и потока электрически заряженных частиц. Это дает возможность решения широкого спектра технологических задач в пищевых производствах за счет воздействия атмосферной плазмой. Наиболее часто целью обработки холодной плазмой является подавление нежелательной/патогенной микрофлоры на разных этапах переработки пищевого сырья и на упаковочных материалах и рабочих поверхностях технологического оборудования за счет нарушения клеточных мембран и метаболических процессов. Более того, приведена информация о возможности использования атмосферной плазмы для инактивации вирусов.

Показана возможность интенсификации технологических процессов в ряде отраслей пищевых производств: экстракции целевых компонентов сырья, инактивация нежелательных ферментов или, напротив, повышения активности нужных биокатализаторов, улучшения функционально-технологических свойств сырья, полупродуктов и их отдельных компонентов.

Обработка низкотемпературной плазмой может быть эффективным способом снижения концентрации микотоксинов, накопленных в сырье еще до начала его промышленной переработки.

Предложены методы непрямого воздействия холодной плазмой за счет предварительной обработки ею технологической воды и воздуха «рабочей зоны».

При этом существуют ограничения рассматриваемого способа обработки, связанные с недостатком информации о вызываемых ею изменениях химического состава пищевого продукта и его органолептических характеристик, потенциальным накоплением ксенобиотиков как продуктов разрушения микробных клеток, а также отсутствием единого принципа разработки устройств для генерации плазмы и режимов ее применения.

Таким образом, обработка атмосферной плазмой может быть эффективным инструментом решения широкого спектра задач в пищевых производствах, однако для ее внедрения в индустриальном масштабе требуется отработка режимов ее проведения, применение рационального оборудования и доказательства отсутствия негативных последствий применения такого приема в рамках конкретной технологии.

ВКЛАД АВТОРОВ

Карпенко Д.В.: концептуализация, методология, администрирование данных, создание рукописи и ее редактирование

Гришин А.Г.: проведение исследования, верификация данных, создание черновика рукописи

ЛИТЕРАТУРА

Amini, M., & Ghoranneviss, M. (2016). Effects of cold plasma treatment on antioxidants activity, phenolic contents and shelf life of fresh and dried walnut (*Juglans regia* L.) cultivars during storage. *LWT — Food Science and Technology, 73*, 178–184. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.06.014

Andreou, A., Giannoglou, M., Xanthou, M.-Z., Passaras, D., Kokkoris, G., Evangelos Gogolides, E., & Katsaros, G. (2023). Inactivation of pectinmethylesterase in fresh orange juice by cold atmospheric plasma technology: A kinetic study. I*nnovative Food Science & Emerging Technologies, 86*,103361. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103361

Baier, M., Görgen, M., Ehlbeck, J., Knorr, D., Herppich, W. B., & Schlüter, O. (2014). Non-thermal atmospheric pressure plasma: Screening for gentle process conditions and antibacterial efficiency on perishable fresh produce. *Innovative Food Science & Emerging Technologies, 22*, 147–157. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2014.01.011

Bahrami, N., Bayliss, D., Chope, G., Penson, S., Perehinec, T., & Fisk, I. D. (2016). Cold plasma: A new technology to modify wheat flour functionality. *Food Chemistry, 202*(1), 247–253. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.01.113

Bartoš, P., Kříž, P., Havelka, Z., Bohatá, A., Olšan, P., Špatenka, P., Čurn, V., & Dienstbier, M. (2017). Plasma technology in food industry: mini-review. *Kvasny Prumysl, 63*(3), 134–138. https://doi.org/10.18832/kp201716

Běláková, S., Havelka, Z., Bohatá, A., Hartman, I., Kábelová, H., Kříž, P., Dienstbier, M., Bartoš, P., & Špatenka, P. (2018). The effect of treatment of barley grain and malt with low-temperature plasma discharge on the malt gushing potential. *Kvasny Prumysl, 64*(6), 314–317. https://doi.org/10.18832/kp201837

Bermudez-Aguirre, D., Wemlinger, E., Pedrow, P., Barbosa-Cánovas, G., & Garcia-Perez, M. (2013). Effect of atmospheric pressure cold plasma (APCP) on the inactivation of *Escherichia coli* in fresh produce, *Food Control, 34*(1), 149–157. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.04.022

Bu, F., Feyzi, S., Nayak, G., Mao, Q., Santosh K. Kondeti, V. S., Bruggeman, P., Chen, C., & Ismail, B. P. (2023). Investigation of novel cold atmospheric plasma sources and their impact on the structural and functional characteristics of pea protein. *Innovative Food Science & Emerging Technologies, 83*, 103248. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103248

Bursać Kovačević, D., Putnik, P., Dragović-Uzelac, V., Pedisić, S., Režek Jambrak, A., & Herceg, Z. (2016). Effects of cold atmospheric gas phase plasma on anthocyanins and color in pomegranate juice. *Food Chemistry, 190*, 317–323. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.05.099

Bußler, S., Herppich, W.B., Neugart, S., Schreiner, M., Ehlbeck, J., Rohn, S., & Schlüter, O. (2015). Impact of cold atmospheric pressure plasma on physiology and flavonol glycoside profile of peas (*Pisum sativum* "Salamanca"). *Food Research International, 76*, 132–141. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.03.045

Chanioti, S., Giannoglou, M., Stergiou, P., Passaras, D., Dimitrakellis, P., Kokkoris, G., Gogolides, E., & Katsaros, G. (2023). Plasma-activated water for disinfection and quality retention of sea bream fillets: Kinetic evaluation and process optimization. *Innovative Food Science & Emerging Technologies, 85*,103334. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103334

Dasan, B. G., Boyaci, I. H., & Mutlu, M. (2016). Inactivation of aflatoxigenic fungi (*Aspergillus* spp.) on granular food model, maize, in an atmospheric pressure fluidized bed plasma system. *Food Control, 70*, 1–8. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.05.015

Durek, J., Fröhling, A., Bußler, S., Hase, A., Ehlbeck, J., & Schlüter, O. K. (2022). Pilot-scale generation of plasma processed air and its influence on microbial count, microbial diversity, and selected quality parameters of dried herbs. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *75*, 102890. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102890

Ehlbeck, J., Schnabel, U., Andrasch, M., Stachowiak, J., Stolz, N., Fröhling, A., Schlüter, O., & Weltmann, K. D. (2015). Plasma treatment of food. *Contributions to Plasma Physics, 55*(10), 753–757. https://doi.org/10.1002/ctpp.201510013

Hou, X., Wang, J., Mei, Y., Ge, L., Qian, J., Huang, Y., Yang, M., Li, H., Wang, Y., Yan, Z., Peng, D., Zhang, J., & Zhao, N. (2023). Antibiofilm mechanism of dielectric barrier discharge cold plasma against *Pichia manshurica*. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *85*, 103340. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103340

Illera, A. E., Souza, V. R., Nikmaram, N., Tang, L., Keener, K. M. (2022). High voltage atmospheric cold plasma decontamination of *Salmonella enteritidis* on chicken eggs. Innovative *Food Science & Emerging Technologies*, *82*, 103210. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103210

Jaddu, S., Pradhan, R. C., & Dwivedi, M. (2022). Effect of multipin atmospheric cold plasma discharge on functional properties of little millet (*Panicum miliare*) flour. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *77*, 102957. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.102957

Jeon, Y. J., Lee, H., & Min, S. C. (2023). Effects of in-package atmospheric dielectric barrier discharge cold plasma treatment on the antimicrobial efficacy of whey protein isolate-based edible films that incorporate malic acid against *Salmonella* in chicken breast processed meat. *Innovative Food Science & Emerging Technologies, 85*, 103339. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103339

Joy, J. K., Kalaivendan, R. G. T., Eazhumalai, G., Kahar, S. P., & Annapure, U. S. (2022). Effect of pin-to-plate atmospheric cold plasma on jackfruit seed flour functionality modification. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *78*, 103009. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103009

Katsaros, G., Giannoglou, M., Chanioti, S., Roufou, S., Javaheri, A., de Oliveira Mallia, J., Gatt, R., Agalou, A., Beis, D., & Valdramidis,

V. (2023). Production, characterization, microbial inhibition, and in vivo toxicity of cold atmospheric plasma activated water. *Innovative Food Science & Emerging Technologies, 84*, 103265. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103265

Katsigiannis, A. S., Hojnik, N., Modic, M., Bayliss, D. L., Kovač, J., & Walsh, J. L. (2022). Continuous in-line decontamination of food-processing surfaces using cold atmospheric pressure air plasma. *Innovative Food Science & Emerging Technologies, 81*, 103150. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103150

Khoshkalam Pour, A., Khorram, S., Ehsani, A., Ostadrahimi, A., & Ghasempour, Z. (2022). Atmospheric cold plasma effect on quality attributes of banana slices: Its potential use in blanching process. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *76,* 102945. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.102945

Kim, Y. H., Lee, C., Lee, S.-J., & Yoon, K. S. (2022). Reduction of *E. coli* O157: H7 and *Bacillus cereus* levels in red pepper powder using dielectric barrier discharge (DBD) plasma for enhanced quality. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *76*, 102916. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.102916

Kim, B., Yun, H., Jung, S., Jung, Y., Jung, H., Choe, W., & Jo, C. (2011). Effect of atmospheric pressure plasma on inactivation of pathogens inoculated onto bacon using two different gas compositions. *Food Microbiology, 28*(1), 9–13. https://doi.org/10.1016/j.fm.2010.07.022

Konvalina, P., Štěrba, Z., Vlášek, O., Moudrý, jr., J., Capouchová, I., & Stehno, Z. (2016). *Fusarium* spp. occurrence in grains of ancient wheat species. *Romanian Agricultural Research, 33*, 307–311.

Kříž, P., Bartoš, P., Havelka, Z., Kadlec, J., Olšan, P., Špatenka, P., & Dienstbier, M. (2015). Influence of plasma treatment in open air on mycotoxin content and grain nutriments. *Plasma medicine, 5*(2), 145–158. https://doi.org/10.1615/plasmamed.2016015752

Kumar, S., Pipliya, S., & Srivastav, P. P. (2023). n^{th} order kinetic modelling of peroxidase and polyphenol oxidase inactivation in kiwifruit juice during cold plasma and thermal treatment. *Innovative Food Science & Emerging Technologies, 89*, 103475. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103475

Lee, H. J., Jung, H., Choe, W., Ham, J. S., Lee, J. H., & Jo, C. (2011). Inactivation of *Listeria monocytogenes* on agar and processed meat surfaces by atmospheric pressure plasma jets. *Food Microbiology, 28*(8), 1468–1471. https://doi.org/10.1016/j.fm.2011.08.002

Lee, K. H., Kim, H. J., Woo, K. S., Jo, C., Kim, J. K., Kim, S. H., Park, H. Y., Oh, S. K., & Kim, W. H. (2016). Evaluation of cold plasma treatments for improved microbial and physicochemical qualities of brown rice. *LWT — Food Science and Technology, 73*, 442–447. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.06.055

Li, J., Li, Z., Ma, O., & Zhou, Y. (2023). Enhancement of anthocyanins extraction from haskap by cold plasma pretreatment. *Innovative Food Science & Emerging Technologies, 84*, 103294. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103294

Li, S., Yao, X., Wang, X., Tian, S., Zhang, Y. (2022). Reactive molecular dynamics simulation on degradation of aflatoxin B_1 by cold atmospheric plasmas. *Innovative Food Science & Emerging Technologies, 80*, 103101. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103101

Lin, C.-M., Kumar Patel, A., Chiu, Y.-C., Hou, C.-Y., Kuo, C.-H., Dong, C.-D., & Chen, H.-L. (2022). The application of novel rotary plasma jets to inhibit the aflatoxin-producing *Aspergillus flavus* and the spoilage fungus, *Aspergillus niger* on peanuts. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *78*, 102994. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.102994

Maeda, K., Toyokawa, Y., Shimizu, N., Imanishi, Y., & Sakudo, A. (2015). Inactivation of *Salmonella* by nitrogen gas plasma generated by a static induction thyristor as a pulsed power supply. *Food Control, 52*, 54–59. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.12.012

Malachová, A., Hajšlová, J., Ehrenbergerová, J., Kostelanská, M., Zachariášová, M., Urbanová, J., Cerkal, R., Šafránková, I., Marková, J., Vaculová, K., & Hrstková, P. (2010). *Fusarium* mycotoxins in spring barley and their transfer into malt. *Kvasny Prumysl, 56*(3), 131–137. https://doi.org/10.1002/jsfa.4112

Mehta, D., Purohit, A., Bajarh, P., Yadav, K., Shivhare, U. S., & Yadav, S. K. (2022). Cold plasma processing improved the extraction of xylooligosaccharides from dietary fibers of rice and corn bran with enhanced in-vitro digestibility and anti-inflammatory responses. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *78*, 103027. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103027

Misra, N. N., Keener, K. M., Bourke, P., Mosnier, J. P., & Cullen, P. J. (2014). In-package atmospheric pressure cold plasma treatment of cherry tomatoes. *Journal of Bioscience and Bioengineering, 118*(2), 177–182. https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2014.02.005

Misra, N. N., Patil, S., Moiseev, T., Bourke, P., Mosnier, J. P., Keener, K. M., Cullen, P. J. (2014). In-package atmospheric pressure cold plasma treatment of strawberries. *Journal of Food Engineering, 125*, 131–138. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.10.023

Moisan, M., Barbeau, J., Moreau, S., Pelletier, J., Tabrizian, M., & Yahia, L. (2001). Low-temperature sterilization using gas plasmas: a review of the experiment and an analysis of the inactivation mechanisms. *International Journal of Pharmaceutics, 226*(1–2), 1–21. https://doi.org/10.1016/S0378–5173(01)00752–9

Molina-Hernandez, J. B., Capelli, F., Laurita, R., Tappi, S., Laika, J., Gioia, L., Valbonetti, L., Chaves-López, C. (2022). A comparative study on the antifungal efficacy of cold atmospheric plasma at low and high surface density on Aspergillus chevalieri and mechanisms of action. *Innovative Food Science & Emerging Technologies, 82*, 103194. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103194

Molina-Hernandez, J. B., Landi, L., De Flaviis, R., Laika, J., Romanazzi, G., & Chaves-Lopez, C. (2023). Understanding the mechanisms of action of atmospheric cold plasma towards

the mitigation of the stress induced in molds: The case of *Aspergillus chevalieri*. *Innovative Food Science & Emerging Technologies, 90*, 103492, https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103492

Nagl, V., & Schatzmayr, G. (2015). Deoxynivalenol and its masked forms in food and feed. *Current Opinion in Food Science, 5*, 43–49. https://doi.org/10.1016/j.cofs.2015.08.001

Naïtali, M., Herry, J. M., Hnatiuc, E., Kamgang, G., & Brisset, J. L. (2012). Kinetics and bacterial inactivation induced by peroxynitrite in electric discharges in air. *Plasma Chemistry and Plasma Processing, 32*, 675–692. https://doi.org/10.1007/s11090–012-9383-y

Oh, Y. A., Roh, S. H., & Min, S. C. (2016). Cold plasma treatments for improvement of the applicability of defatted soybean meal-based edible film in food packaging. *Food Hydrocolloids, 58*(2), 150–159. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.02.022

Palabiyik, I., Kopuk, B., Konar, N., & Toker, O. S. (2023). Investigation of cold plasma technique as an alternative to conventional alkalization of cocoa powders. *Innovative Food Science & Emerging Technologies, 88*, 103440. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103440

Pasquali, F., Stratakos, A.C., Koidis, A., Berardinelli, A., Cevoli, C., Ragni, L., Mancusi, R., Manfreda, G., & Trevisani, M. (2016). Atmospheric cold plasma process for vegetable leaf decontamination: A feasibility study on radicchio (red chicory, *Cichorium intybus* L.). *Food Control, 60*, 552–559. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.08.043

Perni, S., Liu, D., Shama, G., & Kong, M. (2008). Cold atmospheric plasma decontamination of the pericarps of fruit. *Journal of Food Protection, 71*(2), 302–308. https://doi.org/10.4315/0362–028X-71.2.302

Ramazzina, I., Berardinelli, A., Rizzi, F., Tappi, S., Ragni, L., Sacchetti, G., & Rocculi, P. (2015). Effect of cold plasma treatment on physico-chemical parameters and antioxidant activity of minimally processed kiwifruit. *Postharvest Biology and Technology, 107*(4), 55–65. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.04.008

Ramos, B., Miller, F. A., Brandão, T. R. S., Teixeira, P., & Silva, C. L. M. (2013). Fresh fruits and vegetables — An overview on applied methodologies to improve its quality and safety. *Innovative Food Science & Emerging Technologies, 20*, 1–15. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.07.002

Ragni, L., Berardinelli, A., Vannini, L., Montanari, C., Sirri, F., Guerzoni, M.E., & Guarnieri, A. (2010). Non-thermal atmospheric gas plasma device for surface decontamination of shell eggs. *Journal of Food Engineering, 100*(1), 125–132. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.03.036

Ricciardi, E. F., Del Nobile, M. A., Conte, A., Fracassi, F., & Sardella, E. (2022). Effects of plasma treatments applied to fresh ricotta cheese. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *76*, 102935. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.102935

Rivero, W. C., Wang, Q., Salvi, D. (2022). Impact of plasma-activated water washing on the microbial inactivation, color, and electrolyte leakage of alfalfa sprouts, broccoli sprouts, and clover sprouts. *Innovative Food Science & Emerging Technologies, 81*, 103123. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103123

Rout, S., & Srivastav, P. P. (2023). Effect of cold plasma on the technological and functional modification of plant proteins and enzymes. *Innovative Food Science & Emerging Technologies, 88*, 103447. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103447

Rød, S. K., Hansen, F., Leipold, F., & Knøchel, S. (2012). Cold atmospheric pressure plasma treatment of ready-to-eat meat: Inactivation of *Listeria innocua* and changes in product quality. *Food Microbiology, 30*(1), 233–238. https://doi.org/10.1016/j.fm.2011.12.018

Shen, H., Ge, X., Zhang, Q., Zhang, X., Lu, Y., Jiang, H., Zhang, G., & Li, W. (2022). Dielectric barrier discharge plasma improved the fine structure, physicochemical properties and digestibility of α-amylase enzymatic wheat starch. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *78*, 102991. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.102991

Song, H. P., Kim, B., Choe, J. H., Jung, S., Moon, S. Y., Choe, W., & Jo, C. (2009). Evaluation of atmospheric pressure plasma to improve the safety of sliced cheese and ham inoculated by 3-strain cocktail *Listeria monocytogenes*. *Food Microbiology, 26*(4), 432–436. https://doi.org/10.1016/j.fm.2009.02.010

Sudarsan, A., & Keener, K. (2022). Inactivation of spoilage organisms on baby spinach leaves using high voltage atmospheric cold plasma (HVACP) and assessment of quality. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *79*, 103023. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103023

Tappi, S., Nissen, L., Casciano, F., Antonelli, G., Chiarello, E., Picone, G., Laurita, R., Capelli, F., Gherardi, M., Maccaferri, C., Gianotti, A., Bordoni, A., Espmark, Å. M., Capozzi, F., & Rocculi, P. (2023). Effect of cold plasma generated with different gas mixtures on safety, quality and nutritional aspects of fresh sea bream fillets. *Innovative Food Science & Emerging Technologies, 89*, 103477. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103477

Tappi, S., Ramazzina, I., Rizzi, F., Sacchetti, G., Ragni, L., & Rocculi, P. (2018). Effect of plasma exposure time on the polyphenolic profile and antioxidant activity of fresh-cut apples. *Applied Sciences, 8*(10), 1939. https://doi.org/10.3390/app8101939

Velebit, B., Milojević, L., Baltić, T., Grković, N., Gummalla, S., Velebit, M., Škoko, I, Mojsova, S., Putnik, P. (2022). Efficacy of cold atmospheric plasma for inactivation of viruses on raspberries. *Innovative Food Science & Emerging Technologies, 81*, 103121. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103121

Wang, J., Zhuang, H., Hinton, A., Zhang, J. (2016). Influence of in-package cold plasma treatment on microbiological shelf life and appearance of fresh chicken breast fillets. *Food Microbiology, 60*(1), 142–146. https://doi.org/10.1016/j.fm.2016.07.007

Wang, Q., Lavoine, N., & Salvi, D. (2023). Cold atmospheric pressure plasma for the sanitation of conveyor belt materials: Decontamination efficacy against adherent bacteria and biofilms of Escherichia coli and effect on surface properties. *Innovative Food Science & Emerging Technologies, 84*, 103260. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103260

Wang, T., Li, N., Luo, S., Wang, L., Jiang, L., Yu, D., & Han, C. (2022). Catalyst activation by cold plasma technology and its effect on isomerization of safflower seed oil. Innovative *Food Science & Emerging Technologies*, *76*, 102942. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.102942

Wang, Z., Zhao, Q., Gan, Y., Fan, Q., Hu, Z., Wang, Z., Cai, R., Yue, T., & Yuan, Y. (2023). Inactivation of *Alicyclobacillus contaminans* spores by dielectric barrier discharge plasma and its biological mechanism. *Innovative Food Science & Emerging Technologies, 87,* 103415. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103415

Wongjaikham, W., Kongprawes, G., Wongsawaeng, D., Ngaosuwan, K., Kiatkittipong, W., Hosemann, P., & Assabumrungrat, S. (2022). Production of low trans-fat margarine by partial hydrogenation of palm oil using nature-friendly and catalyst-free microwave plasma technique. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *80*, 103107. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103107

Wu, Q., Shen, C., Li, J., Wu, D., & Chen, K. (2022). Application of indirect plasma-processed air on microbial inactivation and quality of yellow peaches during storage. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *79*, 103044. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103044

Xiao, H., Zhang, S., Xi, F., Yang, W., Zhou, L., Zhang, G., Zhu, H., & Zhang, Q. (2023). Preservation effect of plasma-activated water (PAW) treatment on fresh walnut kernels. *Innovative Food Science & Emerging Technologies, 85*, 103304. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103304

Xu, P., & Tan, J. (2023). Inactivation and removal of *Klebsiella michiganensis* biofilm attached to the inner surfaces of piping by plasma-activated microbubble water (PMBW). *Innovative Food Science & Emerging Technologies, 86*, 103360. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103360

Yang, T., Wang, Y., Yang, B., Zhang, Y., Wang, J., Qiang, S., Zhou, J., Li, S., & Chen, Y. (2023). Thin sheets of bean curd treated by cold plasma: Changes in surface structure and physicochemical properties. *Innovative Food Science & Emerging Technologies, 84*, 103288. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103288

Zahoranová, A., Henselová, M., Hudecová, D., Kaliňáková, B., Kováčik, D., Medvecká, V., & Černák, M. (2016). Effect of cold atmospheric pressure plasma on the wheat seedlings vigor and on the inactivation of microorganisms on the seeds surface. *Plasma Chemistry and Plasma Processing, 36*(2), 397–414. https://doi.org/10.1007/s11090–015-9684-z

Zhao, S.-Q., Chen, L., Yan, B., Wang, L.-H., Zeng, X.-A., & Aadil, R. M. (2023). Inactivation of Alicyclobacillus acidoterrestris vegetative cells and spores induced by atmospheric cold plasma. *Innovative Food Science & Emerging Technologies, 89*, 103461. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103461

Zhao, Y., Shao, L., Jia, L., Zou, B., Dai, R., Li, X., & Jia, F. (2022). Inactivation effects, kinetics and mechanisms of air- and nitrogen-based cold atmospheric plasma on *Pseudomonas aeruginosa*. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *79*, 103051. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2022.103051

Zhi, A., Shi, S., Li, Q., Shen, F., He, X., Fang, Y., Hu, Q., & Jiang, X. (2023). Aflatoxins degradation and quality evaluation in naturally contaminated rice by dielectric barrier discharge cold plasma. Innovative *Food Science & Emerging Technologies, 88*, 103426. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103426

Zhu, W., Tan, G., Han, M., Bu, Y., Li, X., & Li, J. (2023). Evaluating the effects of plasma-activated slightly acidic electrolyzed water on bacterial inactivation and quality attributes of Atlantic salmon fillets. *Innovative Food Science & Emerging Technologies, 84*, 103286. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103286

Ziuzina, D., Patil, S., Cullen, P. J., Keener, K. M., Bourke, P. (2014). Atmospheric cold plasma inactivation of *Escherichia coli*, *Salmonella enterica* serovar *Typhimurium* and *Listeria monocytogenes* inoculated on fresh produce. *Food Microbiology, 42*, 109–116. https://doi.org/10.1016/j.fm.2014.02.007