

Обзорная статья
УДК 664.8
EDN: RETQHK
DOI: 10.21285/achb.914



Влияние обработки холодной плазмой на качество и пищевую ценность растительного сырья. Обзор предметного поля

Л.Ч. Бурак*✉, А.Н. Сапач*, А.П. Завалей**

*ООО «БЕЛРОСАКВА», Минск, Республика Беларусь

**СООО «Ароматик», Дзержинск, Республика Беларусь

Аннотация. Холодная плазма является одной из новых технологий нетермической обработки пищевых продуктов, которая способствует увеличению срока годности пищевых продуктов растительного происхождения без отрицательного влияния на пищевую ценность и органолептические показатели. Цель проведенной работы состояла в анализе результатов исследований влияния обработки холодной плазмой растительного сырья на его химический состав и вторичные растительные метаболиты, а также органолептические показатели. В обзор включены статьи, опубликованные на английском языке за 2015–2023 годы. Поиск научной литературы по данной теме проводился по ключевым словам в библиографических базах Scopus и Web of Science. Результаты исследований показали, что влияние обработки холодной плазмой на белки, липиды, углеводы и органолептические показатели растительного сырья зависело в основном от времени воздействия, напряженности, мощности, частоты, скорости потока газа, а также количества и вида обрабатываемого растительного сырья. Благодаря высокому окислительному потенциалу и антимикробной активности технология холодной плазмы может служить эффективным способом увеличения срока годности и сохранения растительного сырья, не оказывая при этом отрицательного воздействия на органолептические, физико-химические показатели и пищевую ценность продукта. Вместе с тем для широкого промышленного внедрения существуют ограничения. Необходимо проводить дальнейшие исследования по установлению конкретных параметров обработки для разного вида сырья, а также подтверждению безопасности и возможной токсичности пищевых продуктов, обработанных холодной плазмой.

Ключевые слова: растительное сырье, холодная плазма, белки, липиды, углеводы, вторичные метаболиты

Для цитирования: 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. N 2. С. 173–183. DOI: 10.21285/achb.914. EDN: RETQHK.

PHYSICOCHEMICAL BIOLOGY

Review article

Effect of cold plasma treatment on the quality and nutritional value of plant materials. Scoping review

Leonid Ch. Burak*✉, Alexander N. Sapach*, Andrey P. Zavaley**

*BELROSAKVA Limited Liability Company, Minsk, Republic of Belarus

**Aromatik Joint Limited Liability, Dzerjinsk, Republic of Belarus

Abstract. Cold plasma treatment is a new technology for non-thermal processing of food products, which helps to increase the expiration date of plant foods without adversely affecting their nutritional value and

© Бурак Л.Ч., Сапач А.Н., Завалей А.П., 2024

organoleptic parameters. The work was aimed at analyzing studies into the effect of cold plasma treatment of plant materials on their chemical composition and secondary plant metabolites, as well as organoleptic parameters. The review includes articles published in English in 2015–2023. The search for scientific literature on this topic was conducted across Scopus and Web of Science using keywords. The studies show that the effect of cold plasma treatment on proteins, lipids, carbohydrates, and organoleptic parameters of plant materials depended primarily on the exposure time, intensity, power, frequency, gas flow rate, as well as the amount and type of processed plant materials. Due to the high oxidation potential and antimicrobial activity, cold plasma technology can provide an effective way to increase the shelf life and expiration date of plant materials without adversely affecting the organoleptic parameters, physicochemical parameters, and nutritional value of the product. However, limitations exist for its widespread industrial implementation. Further studies are required to determine specific treatment parameters for different types of materials and to confirm the safety and possible toxicity of cold plasma-treated food products.

Keywords: plant materials, cold plasma, proteins, lipids, carbohydrates, secondary metabolites

For citation: Burak L.Ch., Sapach A.N., Zavaley A.P. Effect of cold plasma treatment on the quality and nutritional value of plant materials. Scoping review. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2024;14(2):173-183. (In Russian). DOI: 10.21285/achb.914. EDN: RETQHK.

ВВЕДЕНИЕ

Для консервирования пищевых продуктов растительного происхождения обычно используется традиционная термическая обработка. К сожалению, применение тепла может отрицательно повлиять на органолептические показатели и пищевую ценность продукта. В то же время в мире активно растет спрос на здоровые продукты, которые не содержат пищевых добавок и подвергаются минимальной обработке. Данный факт вызывает необходимость поиска и внедрения предприятиями пищевой продукции альтернативных технологий обработки сырья.

Холодная плазма является одним из новейших методов нетермической обработки пищевых продуктов последних лет. Эта технология может использоваться для микробного обеззараживания, повышения функциональности пищевых продуктов, контроля и удаления пестицидов и аллергенов [1]. Плазма создается частично или полностью ионизированным газом, содержащим электроны, свободные радикалы, ионы, и эти активные частицы используются для обработки продуктов при низких температурах. Использование метода холодной плазмы в пищевой промышленности имеет большое количество преимуществ. Данный способ обработки энергоэффективен и экологичен, так как не требует использования воды и дезинфицирующих химических веществ. Он применим как для твердых, так и для жидких продуктов и не имеет побочных продуктов. По сравнению с традиционными технологиями время обработки холодной плазмой короче, к тому же данный метод не требует применения нагрева, давления и вакуума, что делает его недорогим [2]. Однако существуют некоторые ограничения технологии холодной плазмы, такие как сложность контроля химического состава реактивных продуктов плазмы для продуктов с высоким содержанием влаги, окисление липидов в продуктах с высоким содержанием жиров и увеличение стоимости обработки при использовании инертного газа. Кроме того, эффективность применения холодной плазмы для микробной инактивации может снижаться в продуктах с высоким содержанием белка из-за восстановления микроорганизмов путем удаления реактивных форм плазмы. Несмотря на то что в пищевой промышленности плазменная технология все еще находится на стадии разработки, ее применение продемонстрировало эффективность обработки для обеспечения

безопасности различных пищевых продуктов. Параметры плазменной обработки, включая напряжение, частоту, состав газа, время обработки, тип воздействия плазмы и геометрию электродов, влияют на образование реактивных частиц. Оптимизация этих параметров для дезактивации микроорганизмов, сохранения качества продуктов является сложной задачей ввиду разнообразия свойств растительной пищи. Некоторые исследователи сообщают о незначительном изменении качества обработанных холодной плазмой продуктов растительного происхождения – это может отрицательно влиять на их пищевую ценность, вкус, цвет и текстуру [3]. Исследования показали увеличение антиоксидантной активности компонентов растительных продуктов, обработанных холодной плазмой, что может быть связано с высвобождением биологически активных соединений путем разрушения под воздействием плазмы клеточных мембран. Кроме того, при воздействии плазмы происходила инактивация ферментов в пищевом сырье. Основная цель представленной работы заключалась в проведении обзора результатов исследований влияния обработки холодной плазмой растительного сырья на его химический состав, вторичные растительные метаболиты и органолептические показатели, а также в представлении краткой характеристики технологии холодной плазмы и перспектив ее промышленного использования.

ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ

Различают два вида холодной плазмы: атмосферного и низкого давления. В последнее время пищевая промышленность проявляет особый интерес к системам холодной плазмы атмосферного давления, поскольку они сохраняют те же свойства, что и плазма низкого давления [4]. Источниками генерации холодной плазмы атмосферного давления могут быть диэлектрический барьерный разряд, коронный разряд, радиочастотный разряд и микроволновый разряд. Наиболее широко используемым методом генерации плазмы является диэлектрический барьерный разряд, при котором она создается посредством импульсов переменного тока высокого напряжения между двумя электродами, покрытыми изолирующими материалами из стекла, пластика, кремния или керамики. Этот метод может работать в диапазоне частот от 50 Гц до 1 МГц за счет

использования различных источников газа, таких как гелий, азот, кислород и воздух, что приводит к однородному распределению плазмы [5]. Этот метод является простым, недорогим и универсальным в геометрии электродов, но количество обрабатываемого сырья в ходе его использование ограничено.

Плазма радиочастотного разряда создается при высокой частоте и напряжении с помощью генератора для подачи энергии ионизации газа. Эту плазму можно наносить на поверхность пищевого продукта в виде струи. Требуется короткое время обработки без вакуумной камеры. По сравнению с диэлектрическим барьерным разрядом в этом методе нет ограничений по пространству. Для обработки свежих фруктов и овощей в основном используются азот, инертный газ и воздушно-плазменные струи [6]. Образцы, обработанные радиочастотной плазмой, необходимо непрерывно перемещать для равномерной обработки, поскольку она наносится на небольшую площадь поверхности.

Плазма микроволнового разряда отличается от упомянутых выше видов плазмы. Вместо электродов генератор наводит плазму с помощью антенн или волновода с защитным экраном. Рабочий газ впрыскивается в сопло, расположенное в зоне наибольшей напряженности электрического поля. Диапазоны частот электромагнитного излучения колеблются между 300 МГц и 300 ГГц. В рамках этого метода рабочий газ проходит через систему охлаждения и собирается в концентрационной камере при температуре окружающей среды для обработки проб в нетепловых условиях [5, 6].

СОВРЕМЕННЫЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Исследования показали, что технология холодной плазмы представляет собой хорошую альтернативу традиционным методам пастеризации пищевых продуктов растительного происхождения. В ходе обработки холодной плазмой активные частицы атакуют клеточную стенку, вызывая лизис клеток и повреждая клеточные компоненты грамотрицательных бактерий. При обработке холодной плазмой яблочного и томатного соков было достигнуто 5-кратное логарифмическое снижение количества *Citrobacter freundii* и 6-кратное логарифмическое снижение *Escherichia coli* соответственно [7]. Кроме того, было установлено 6-кратное логарифмическое снижение количества *Escherichia coli* в вишневом соке после обработки холодной плазмой при атмосферном давлении [8]. Эффективность инактивации микроорганизмов зависит от условия обработки, источника плазмы, состава продукта, а также типа бактерий. Результаты исследования П. Каземзаде с соавторами показали эффективность холодной плазмы в отношении адаптированной к хлору *Salmonella enterica*, а при обработке холодной плазмой зеленого лука было обнаружено примерно 3-кратное логарифмическое снижение их количества [9]. У грамположительных бактерий при обработке холодной плазмой не происходит лизиса клеток, но повреждаются клеточные компоненты, такие как ДНК [10]. Установлено, что воздействие плазмы диэлектрического барьерного разряда на ягоды клубники в течение 20 минут приводит

к 1,46- и 2,75-кратному логарифмическому снижению общего количества аэробных мезофильных бактерий и дрожжей/плесени соответственно [11]. Кроме того, технология холодной плазмы показала эффективность в выведении афлатоксина из орехов. При 20-минутной обработке холодной плазмой низкого давления на воздухе было установлено 50-процентное снижение содержания афлатоксина (*Aspergillus parasiticus*) в фундуке, арахисе и фисташках [12]. Кроме того, плазмоактивированная вода, которая образуется при обработке воды с помощью плазменного устройства, обладает антимикробными свойствами и может использоваться для дезинфекции поверхности фруктов и овощей. В кубиках яблок, погруженных в плазмоактивированную воду на 5 минут и хранившихся при 4 °С в течение 12 дней, было обнаружено примерно 0,6–1,0-кратное логарифмическое снижение количества аэробных бактерий, плесени и дрожжей [13].

Следует отметить исследования влияния холодной плазмы с целью определения эффективности при удалении аллергенов из пищевых продуктов растительного происхождения. Например, иммунореактивность белковой фракции в белке сои была снижена на 89% при непрямом воздействии холодной плазмы атмосферного давления [14]. Согласно исследованию Ц. Чжана с соавторами, воздействие холодной плазмы при атмосферном давлении вызывало модификацию вторичной и третичной структуры изолята соевого белка, уменьшая уровень связывания Ig-E (иммуноглобулина E) изолята до 75% по сравнению с контрольным образцом, и тем самым снижало аллергенность [15]. Благодаря сильному окислительному действию активных частиц плазмы на клеточные мембраны холодная плазма эффективна в борьбе с вредителями при хранении зерновых культур с отсутствием остатков при кратковременной обработке [16]. Кроме того, данная технология ускоряет процесс прорастания семян за счет проникновения активных веществ через их оболочку.

ВЛИЯНИЕ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ НА КОМПОНЕНТЫ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

В процессе применения холодной плазмы модификация белков в основном индуцируется реакциями между активными формами кислорода, а также некоторыми активными формами азота и белками, в то время как активные частицы плазмы оказывают незначительное влияние [17]. Обработка пищевых белков холодной плазмой помимо структуры и функции фермента представляет интерес в областях исследований, таких как технико-функциональные свойства белков, аллергенность и физико-механические свойства белковых пленок. Подтверждено, что активные формы кислорода вызывают изменения в структуре белка, особенно в аминокислотных остатках боковой цепи [17]. Холодная плазма может вызывать разрыв дисульфидных связей с разрывом ковалентных связей и образованием серосодержащих водородных (RSH) и/или кислородных (RSO) форм, которые в итоге приводят к искажению конформации структуры белка. Исследования, касающиеся влияния обработки холодной плазмой на различные свойства растительных белков, были всесторонне изучены с упором на физические и химические модификации белков, физи-

ческие модификации пленок, обработку ферментами и производство наночастиц [18]. Данные исследования показали, что обработка холодной плазмой изолята зеина (75 В, рН 7,0) увеличивает растворимость белка на 25% с дальнейшими эффективными модификациями, гидрофильность – на 24% (65 В, 60 с), а прочность на разрыв – на 28,57% (65 В, 60 с). Модификация белка обработкой холодной плазмой рассматривается как хороший и многообещающий метод улучшения

гелеобразующих свойств [19] (таблица). Растительные белки также можно обрабатывать холодной плазмой в присутствии вспомогательных соединений с целью усиления некоторых специфических свойств. В ходе исследований установлено увеличение гидратационной способности белка арахиса примерно на 160% после обработки холодной плазмой (70 Вт) в присутствии камеди сесбании (из *Sesbania Drummondii*) [20].

Влияние холодной плазмы на компоненты пищевых продуктов растительного происхождения

Effect of cold plasma on components of food products of plant origin

Компоненты растительного сырья	Наименование образца продукта	Параметры обработки холодной плазмой	Результат обработки холодной плазмой	Источник
Белки	Изолят зеина	АХП с ДБР (65–70 В, 60 с, рН 7,0)	Растворимости белка увеличилась на 25%. Гидрофильность повысилась на 24%. Прочность на разрыв увеличилась на 28,57% (для гелей, изготовленных из обработанного изолята зеина)	[21]
	Изолят горохового белка	АХП с ДБР (30 кВ, 10 мин)	Параметры гелеобразования снизились до 70 °С/10–20 мин с 95 °С/60 мин	[20]
	Изолят горохового белка	АХП с ДБР (14,5 Вт, 20 кГц, 30 мин)	Растворимость белка (5% масс.) увеличилась на 22%. Прочность геля (20% вес.) увеличилась на 127%	[22]
	Изолят белка травяного гороха	АХП с ДБР (9,4–18,6 кВ, 30–60 с)	Растворимость белков, гидрофобность поверхности, эмульсионная способность и стабильность изменяются в различной степени при различных комбинациях обработки	[23]
	Белок арахиса	АХП с ДБР (70 Вт)	Способность к гидратации увеличилась на 160%	[24]
	Пшеничный глиадин	АХП (20 кВ, 0–10 мин)	Стабильность пены увеличилась на 70 и 58% при длительности обработки 3–5 мин	[25]
	Изолят соевого белка	АХП с ДБР (18 кВ, 15 мин)	Растворимость, эмульсионная активность, пеноемкость увеличились на 25, 27 и 23%	[26]
	Изолят соевого белка	АХП с ДБР (30 кВ, 3 мин)	Гидрофильность увеличилась на 14%. Шероховатость пленки снизилась на 45%	[27]
	Изолят соевого белка	АХП с ДБР (50 кВ, 75 Гц, 180 с)	Растворимость, гелеобразование, активность эмульсии, стабильность эмульсии и пеноемкость увеличились на 25, 13, 50, 110 и 25% соответственно	[28]
	Сырой арахис	АХП с ДБР (34 кВ, 0, 15, 30, 45, 60 мин)	Аллергенность как Ara h 1, так и Ara h 2 снизилась на 65 и 66% в обезжиренных образцах	[29]
Соевый глицинин	АХП с ДБР (50 кВ, 20 кГц, 5 мин)	Способность связывания IgG и IgE снизилась на 91,64 и 81,49% соответственно	[30]	

Продолжение таблицы

Липиды	Подсолнечник, семена кунжута	АХП с ДБР (25 кВ, 0–30 мин)	Содержание свободных жирных кислот увеличилось на 24 и 9% у подсолнечника и кунжутного масла после 30 дней хранения в темноте соответственно	[31]
	Пальмовое и соевое масло	АХП с ДБР (25 кВ, 4–8 ч)	По сравнению с традиционным производством маргарина: йодное число было ниже на 20%; содержание трансжиров было ниже в 6,12 раза; кислотное число было ниже на 43% до 20 часов хранения	[32]
	Пальмовое масло	АХП с ДБР (100 Вт)	По сравнению с традиционным производством биодизеля: конверсия полиненасыщенных жирных кислот для С18:2 и С18:3 была найдена как 47,4 и 100%; устойчивость к окислению увеличилась на 64% без использования формирования трансжирных кислот	[33]
	Масло семян сафлоры	НВАСР с ДБР (150 Вт, 180 с)	Активацию катализа индуцировали конъюгированной линолевой кислотой, содержание увеличилось на 43%, содержание транс-олеиновой кислоты составило 1,3%, а остаток катализатора – 77%	[34]
Углеводы	Ксантановая камедь	АХП (50 Вт и 60 Вт, 15 и 20 мин)	9,99–10,89 г/100 г влаги. Никаких изменений в углеводах. Пористость – 64,87–70,87%. Насыпная плотность – 416–408 кг/м ³ . Кислотное число – 17,91–19,71 мг/г. Значение рН – 6,17–6,36. Никаких изменений тепловых свойств	[35]
	Мука из семян джекфрута	Стержень к пластине АХП (170, 200 и 230 В, 5–15 мин)	Повышенные растворимость в воде (9,65–14,11 г/г), всасывание (6,39–7,66 г/г), набухающая способность (7,28–8,79 г/г), водоудерживающая способность (2,93–3,48 г/г). Пониженная влажность (8,14–5,26%)	[36]
	Рисовый крахмал	АХП с ДБР (40 В, 0,8 А, 2, 6 10 мин)	Повышенные растворимость в воде при 50–90 °С (0,83–23,35%), набухание при 50–60 °С (2,37–5,48 г/г) и усвояемость <i>in vitro</i> (43,53–49,80%)	[37]
	Мука киноа	АХП с ДБР (50 кВ, 5 и 10 мин; 60 кВ, 5 и 10 мин)	Увеличение маслосодержания по времени обработки (1,61–1,80% и 1,70–1,86% при 50 и 60 кВ). Снижение водоудерживающей способности в зависимости от напряжения и времени воздействия (с 2,42 до 3,70%)	[38]
	Целлюлоза из сахарного тростника	АХП с ДБР (40–70 кВ, 3–12 мин)	Увеличение скорости растворения и времени вмятины, шероховатость и снижение кристалличности под воздействием ХП	[39]
	Рисовые и кукурузные отруби	АХП и вакуумная ХП (220–260 В, 5–30 мин)	Увеличение показателя пребиотической активности после обработки ХП	[40]

Продолжение таблицы

Вторичные метаболиты растений	Напиток из сыворотки со вкусом гуавы	400 Вт, 5, 10 и 15 мин, газ – азот	Всего фенолов: 13,9–14,3 мг GAE/100 мл. Всего каротиноидов: 0,34–0,85 мг каротиноидов/100 мл. 51,3–84,4 г/100 мл витамина С. 1,6–4,6% активности по удалению DPPH. 56,8–87,5% ингибирующей активности ACE (АПФ)	[41]
	Шоколадно-молочный напиток	400 Вт, 5, 10 и 15 мин, газ – азот	Всего фенолов: 4,3–19,6 г GAE/г	[42]
	Спирулиновые водоросли	10–20 Вт, газ – азот	2926–3069 мкг хлорофилла-α/г и 708–713 мкг каротиноидов/г после азотной плазмы. 1142–1381 мкг хлорофилла-α/г и 549–645 мкг каротиноидов/г после воздушной плазмы	[43]
	Клубничный сок	ДБР – атмосферный воздух; 60 кВ; гидротермальная обработка при 121 °С, 10 мин	Максимальный уровень эпигаллокатехина (3,3 мг/л), флоретина (6 мг/л), нарингина (4,9 мг/л), гиприна (5,8 мг/л), 4-О-кофеилхиновой кислоты (7,2 мг/л) и общего содержания фенолов (52 г GAE/кг) после комбинирования ХП (10 мин) и гидротермальной обработки	[44]
	Томатные выжимки	HVACP (60 кВ, 15 мин, воздух, аргон, гелий и азот)	0,94 мг GAE/г фенольных смол в контроле; 1,025 мг GAE/г фенольных смол после гелиевой плазмы; 1,03 г GAE/г фенольных смол после азотной плазмы	[45]
	Виноградные выжимки	HVACP (60 кВ, 5, 10 и 15 мин, гелий)	Увеличение содержания фенолов на 19,8 и 22,8% через 5 и 15 мин соответственно. Увеличение общего количества антоцианов на 30,9 и 22,3% соответственно	[46]
	Обезжиренные рисовые отруби	Вакуумная ХП и ДБР, (220–260 В, 50 Гц, 5–30 мин)	Увеличение усвояемости фенола (TPC: 32,7, 33,5 и 31,6%, TFC: 6,54, 6,86 и 5,98% для образца, обработанного атмосферной плазмой, образца и контроля, обработанных вакуумной холодной плазмой соответственно)	[40]
	Сок из тропических фруктов	Свечение АХП с ДБР, газообразный азот, скорость потока между 10 и 30 мл/мин в течение 5–15 мин при 80 кВ	Увеличение общего содержания фенолов на 9–90%. Увеличение антиоксидантной способности на 7–302%	[47]

Примечание: ХП – холодная плазма; АХП – атмосферная холодная плазма; HVACP – атмосферная холодная плазма высокого напряжения; ДБР – диэлектрический барьерный разряд; GAE – эквиваленты галловой кислоты; ACE (АПФ) – ангиотензинпревращающий фермент; DPPH – 2,2-дифенил-1-пикрилгидразил; TPC – общее содержание фенолов; TFC – общее содержание флавоноидов.

Изолят соевого белка является одним из наиболее изученных белков растительного происхождения по причине его широкого использования [25]. Обработка изолята соевого белка холодной плазмой проводилась с различными параметрами (16, 18, 20 кВ, 5, 10, 15 мин), и исследователи сообщили, что применение 18 кВ в течение 15 минут улучшает технико-функциональные свойства изолята соевого белка больше, чем при других условиях обработки. Растворимость эмульсии и пеноемкость увеличились на 25, 27 и 23% соответственно [48]. Чтобы получить пленки из соевого белка с улучшенными функциональными свойствами, к изоляту белка применяли атмосферную холодную плазму (30 кВ, 3 мин). Было обнаружено, что гидрофильность пленок увеличилась на 14% с точки зрения измерения угла смачивания, а шероховатость пленки уменьшилась на 45%, также улучшились некоторые другие механические свойства, коррелирующие со стабильностью [26].

Точный механизм действия холодной плазмы на аллергенные белки до конца не изучен, тем не менее технология холодной плазмы по-прежнему является одним из наиболее эффективных нетермофизических методов обработки, которые можно использовать для снижения аллергенности пищевых продуктов [27, 29, 49]. На образцах арахиса исследовали влияние обработки холодной плазмой на белок, ответственный за аллергенность (Ara h 1), как один из наиболее распространенных аллергенов. Наибольшее снижение было обнаружено в обезжиренных образцах арахиса: 65 и 66% для Ara h 1 и Ara h 2 соответственно при обработке в течение 45–60 минут [29]. Потенциал аллергенности белков будет зависеть от состава пищевого продукта, а также способа обработки холодной плазмой.

Результаты исследований влияния холодной плазмы на компоненты пищевых продуктов представлены в таблице. Пальмовое и соевое масла обрабатывали холодной плазмой диэлектрического барьерного разряда (25 кВ в течение 4–8 ч) с целью получения маргарина с наличием смеси газа-носителя – 15% водорода и 85% гелия. Минимально необходимое время обработки составляло 4 часа, однако для получения маргарина такой же хорошей текстуры, как у промышленных образцов маргаринов, требуется обработка около 8 часов. В конечном продукте йодное число было снижено на 20%, а обнаруженное содержание трансжиров было примерно в 6 раз ниже, чем в обычном продукте. Кроме того, наблюдалось снижение кислотного числа на 43% через 12–20 часов после обработки, что указывает на возможность продления срока годности гидрогенизированных плазмой маргариновых продуктов [32]. Плазменная обработка была предложена для получения экологически чистого способа производства устойчивых и термостойких структур на основе липидов в качестве потенциального заменителя соединений на основе нефти. Производство биодизеля из масел растительного происхождения посредством низкотемпературной атмосферной гидрогенизации обработки холодной плазмой является одним из последних исследований, отражающих еще один потенциал этого экологически чистого метода. Пальмовое масло частично гидрогенизировали плазменной обработкой с энергозатратами 100 Вт в присутствии 80% водорода при комнатной температуре. По сравнению с традиционным методом конверсия полиненасыщенных жирных кислот

для C18:2 и C18:3 оказалась равной 47,4 и 100% соответственно. Также было установлено, что стабильность к окислению увеличилась на 64% без образования трансжирных кислот [33].

Результаты исследований, представленные в таблице, свидетельствуют о том, что холодную плазму можно использовать для модификации углеводов. А.И. Окъери и другие ученые применили холодную плазму к рисовому, кукурузному и картофельному крахмалу при более высоких уровнях мощности: 120 Вт (плазменная обработка) и 0 Вт (газовая обработка) в течение 1 часа в двух 30-минутных циклах с использованием газовой смеси углекислого газа и аргона. Было установлено, что угловатая или многогранная форма кукурузного и рисового крахмалов и овальная форма картофельного крахмала не изменялись после плазменной или газовой обработки. При этом, хотя существенных изменений температуры склеивания кукурузы не наблюдалось (70,1–70,5 °С), она была снижена для воскового риса (66,9–67,0 °С) и картофеля (64,5 °С) после обработки плазмой и газом по сравнению с необработанными образцами (67,5 °С для рисового крахмала и 66,0 °С для картофельного крахмала), что указывает на дестабилизирующее влияние на структуру гранул воскообразного риса и картофельного крахмала [50].

Как видно из таблицы, были проведены различные исследования, изучающие влияние применения холодной плазмы на биологическую активность, экстрагируемость и биодоступность вторичных метаболитов растений путем варьирования параметров обработки, таких как мощность, частота, скорость потока газа, время обработки и тип газа [41–47]. Результаты показали, что более низкая скорость потока и меньшее время обработки способствуют сохранению большего количества витамина С (84,4 мг/100 мл при скорости потока 10 мл/мин в течение 10 мин) и активности по улавливанию радикалов 2,2-дифенил-1-пикрилгидразида (4,6% при скорости потока 10 мл/мин в течение 5 мин). При этом произошло снижение количества каротиноидов (0,34 мг/100 мл при скорости потока 20 мл/мин в течение 10 мин). Напротив, более высокая скорость потока и длительное время обработки привели к снижению уровня витамина С (54,1 мг/100 мл при скорости потока 30 мл/мин в течение 15 мин) и увеличению уровня каротиноидов (0,85 мг/100 мл при скорости потока 30 мл/мин) по сравнению с обработкой с минимальной скоростью потока в течение 10 минут. Ингибирующая активность ангиотензинпревращающего фермента составила 87,5% при скорости потока 30 мл/мин в течение 15 минут, в то время как ингибирующая активность ангиотензинпревращающего фермента пастеризованного напитка при 63–65 °С в течение 30 минут составляла 55,9%, содержание каротиноидов равнялось 0,33 мг/100 г, витамина С – 36,8 мг/100 мл, 2,2-дифенил-1-пикрилгидразида – 1,3%. Кроме того, общее содержание фенолов в обработанных холодной плазмой образцах составляло 13,6–14,3 мг GAE/100 мл, что было выше по сравнению с пастеризованными образцами (12,5 мг GAE/100 мл) [41].

В ходе исследований установлено, что одновременные процессы, в том числе высвобождение ковалентно связанных соединений под действием разрушения клеточных мембран и деполимеризации полимерных фенолов, а также

уменьшение количества соединений-поглочителей, приводят к увеличению или уменьшению количества вторичных растительных метаболитов и их антиоксидантных свойств [43].

Изменения сенсорных свойств пищевых продуктов, обработанных плазмой, зависят от нескольких факторов, таких как условия/параметры воздействия плазмы, характеристики и содержание обрабатываемого продукта, условия и продолжительность хранения [51]. В недавно опубликованном обзоре Дж.Р. Уорнера в соавторстве с другими учеными сделан вывод, что использование более низкой мощности плазмы при более коротком времени обработки является ключевым эксплуатационным фактором, позволяющим минимизировать потерю органолептических качеств, несмотря на то что значение яркость L^* было обнаружено как уменьшенное, а значение b^* (шкала от синего (-) к желтому (+)) наблюдалось как увеличенное [52]. Изменения могут быть связаны с образованием/агрегацией новых соединений, таких как белки и/или олигосахариды, которые влияют на светимость, усиленное извлечение и высвобождение некоторых пигментов/биоактивных соединений или их дальнейшее окисление может повлиять на цвет продукта [53]. Следует отметить, что обработка плазмой имеет тенденцию к снижению pH, что также может повлиять на все соответствующие параметры сенсорного качества [54]. Следует отметить, что реактивные частицы, образующиеся в плазме, могут взаимодействовать с белковыми/липидными макромолекулами и вызывать нежелательный неприятный привкус [55]. В научных работах был сделан вывод о том, что параметры твердости различных свеженарезанных фруктов и овощей не изменяются или улучшаются после определенного времени хранения [31]. Вместе с тем эффект снижения твердости после плазменной обработки также был показан в зависимости от мощности и времени обработки. Никакого снижения твердости не наблюдалось для образцов черники, обработанных плазмой 60 кВ в течение 1 минуты, однако снижение составило 46% для обработки 60 кВ в течение 5 минут и 66% для обработки 80 кВ в течение 1 минуты [10]. Несмотря на тенденцию к увеличению числа исследований влияния холодной плазмы на сенсорное качество пищевых продуктов (как и на другие физико-химические свойства), необходимы дальнейшие исследования как для выяснения механизма на молекулярном уровне между холодной плазмой и органолептическим параметрами пищевых продуктов, так и для определения механизма использования в промышленных масштабах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Холодная плазма является современной и перспективной технологией нетермической обработки пищевых продуктов растительного происхождения, которая

показала высокую эффективность в микробном обеззараживании, сохранении пищевой ценности и органолептических показателей. Согласно результатам исследований, данная технология способна инактивировать ферменты и увеличивать антиоксидантную активность пищевых продуктов. Кроме того, холодная плазма обладает потенциалом контроля алергенов путем модификации структуры и состава белков активными видами плазмы. Чтобы исследовать влияние холодной плазмы на компоненты пищевых продуктов растительного происхождения, необходимо учитывать различные факторы, такие как тип холодной плазмы, время, напряжение, мощность, частоту, тип газа, скорость потока газа, количество образца, подлежащего воздействию. Для повышения эффективности обработки необходимо учитывать количественный и качественный состав пищевого сырья. Следует отметить, что в процессе обработки холодной плазмой одновременно могут происходить изменения в увеличении или уменьшении содержания растительных компонентов, связанные с разрушением клеточной мембраны, высвобождением ковалентно связанных соединений, деполимеризацией полимерных фенолов и снижением уровня соединений-поглочителей. Содержание и биологическая активность вторичных метаболитов растений могут увеличиваться или уменьшаться в зависимости от одновременного высвобождения ковалентно связанных соединений, деполимеризации полифенолов и снижения количества поглощающих соединений. Обработка холодной плазмой имеет огромный потенциал для улучшения функциональных свойств растительных белков без изменения их сенсорных характеристик. Наиболее приемлемым сырьем для обработки холодной плазмой являются продукты с низким содержанием жиров либо их практическим отсутствием. Внесение антиоксидантов перед обработкой холодной плазмой с целью предотвращения различных физико-химических изменений требует дальнейшего изучения и исследования. Необходимо проводить дальнейшие исследования по разработке технологического оборудования холодной плазмы для обеспечения оптимальных параметров обработки, равномерности плазменного воздействия с целью широкого промышленного внедрения.

Вместе с тем необходимы дополнительные научные исследования с целью определения и токсикологического изучения побочных продуктов, оказывающих негативное влияние на качество обработанного плазмой растительного сырья и продуктов переработки. Кроме того, следует провести сравнение и систематизацию результатов исследований с целью определения параметров плазменной обработки конкретных видов растительного сырья, а также проведения разработки, согласования с органами здравоохранения и утверждения нормативных документов.

REFERENCES

1. Cullen P.J., Lalor J., Scally L., Boehm D., Milosavljević V., Bourke P., et al. Translation of plasma technology from the lab to the food industry. *Plasma Processes and Polymers*. 2018;15(2):1700085. DOI: 10.1002/ppap.201700085.
2. Bermudez-Aguirre D. Chapter 2 – Advances in the inactivation of microorganisms and viruses in food and model systems using cold plasma. In: *Advances in cold plasma applications for food safety and preservation*. San Diego: Academic Press; 2020, p. 49-91. DOI: 10.1016/B978-0-12-814921-8.00002-5.
3. Chen Y.-Q., Cheng J.-H., Sun D.-W. Chemical, physical and physiological quality attributes of fruit and vegetables induced by cold plasma treatment: mechanisms and application advances. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2020;60(16):2676-2690. DOI: 10.1080/10408398.2019.1654429.

4. Punia Bangar S., Trif M., Ozogul F., Kumar M., Chaudhary V., Vukic M., et al. Recent developments in cold plasma-based enzyme activity (browning, cell wall degradation, and antioxidant) in fruits and vegetables. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2022;21(2):1958-1978. DOI: 10.1111/1541-4337.12895.
5. Ali M., Cheng J.-H., Sun D.-W. Effects of dielectric barrier discharge cold plasma treatments on degradation of anilazine fungicide and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) juice. *International Journal of Food Science & Technology*. 2021;56(1):69-75. DOI: 10.1111/ijfs.14600.
6. Bogdanov S.A., Gorbachev A.M., Vikharev A.L., Radishev D.B., Lobaev M.A. Study of microwave discharge at high power density conditions in diamond chemical vapor deposition reactor by optical emission spectroscopy. *Diamond and Related Materials*. 2019;97:107407. DOI: 10.1016/j.diamond.2019.04.030.
7. Bußler S., Ehlbeck J., Schlüter O.K. Pre-drying treatment of plant related tissues using plasma processed air: Impact on enzyme activity and quality attributes of cut apple and potato. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2017;40:78-86. DOI: 10.1016/j.ifset.2016.05.007.
8. Hosseini S.M., Rostami S., Hosseinzadeh Samani B., Lorigooini Z. The effect of atmospheric pressure cold plasma on the inactivation of *Escherichia coli* in sour cherry juice and its qualitative properties. *Food Science & Nutrition*. 2020;8(2):870-883. DOI: 10.1002/fsn3.1364.
9. Kazemzadeh P., Khorram S., Mahmoudzadeh M., Ehsani A. Effect of atmospheric cold plasma (ACP) on chlorine adapted *Salmonella enterica* on spring onion. *Letters in Applied Microbiology*. 2022;75(5):1307-1318. DOI: 10.1111/lam.13799.
10. Sarangapani C., O'Toole G., Cullen P.J., Bourke P. Atmospheric cold plasma dissipation efficiency of agrochemicals on blueberries. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2017;44:235-241. DOI: 10.1016/j.ifset.2017.02.012.
11. Ahmadnia M., Sadeghi M., Abbaszadeh R., Ghomi Marzdashti H.R. Decontamination of whole strawberry via dielectric barrier discharge cold plasma and effects on quality attributes. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2021;45(1):e15019. DOI: 10.1111/jfpp.15019.
12. Pankaj S.K., Shi H., Keener K.M. A review of novel physical and chemical decontamination technologies for aflatoxin in food. *Trends in Food Science & Technology*. 2018;71:73-83. DOI: 10.1016/j.tifs.2017.11.007.
13. Liu C., Chen C., Jiang A., Sun X., Guan Q., Hu W. Effects of plasma-activated water on microbial growth and storage quality of fresh-cut apple. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2020;59:102256. DOI: 10.1016/j.ifset.2019.102256.
14. Meinschmidt P., Ueberham E., Lehmann J., Reineke K., Schlüter O., Schweiggert-Weisz U., et al. The effects of pulsed ultraviolet light, cold atmospheric pressure plasma, and gamma-irradiation on the immunoreactivity of soy protein isolate. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2016;38:374-383. DOI: 10.1016/j.ifset.2016.06.007.
15. Zhang Q., Cheng Z., Zhang J., Nasiru M.M., Wang Y., Fu L. Atmospheric cold plasma treatment of soybean protein isolate: Insights into the structural, physicochemical, and allergenic characteristics. *Journal of Food Science*. 2021;86(1):68-77. DOI: 10.1111/1750-3841.15556.
16. Sarangapani C., Patange A., Bourke P., Keener K., Cullen P.J. Recent advances in the application of cold plasma technology in foods. *Annual Review of Food Science and Technology*. 2018;9:609-629. DOI: 10.1146/annurev-food-030117-012517.
17. Akharume F.U., Aluko R.E., Adedeji A.A. Modification of plant proteins for improved functionality: a review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2021;20(1):198-224. DOI: 10.1111/1541-4337.12688.
18. Basak S., Annapure U.S. Recent trends in the application of cold plasma for the modification of plant proteins – a review. *Future Foods*. 2022;5:100119. DOI: 10.1016/j.fufo.2022.100119.
19. Mollakhalili-Meybodi N., Yousefi M., Nematollahi A., Khorshidian N. Effect of atmospheric cold plasma treatment on technological and nutrition functionality of protein in foods. *European Food Research and Technology*. 2021;247:1579-1594. DOI: 10.1007/s00217-021-03750-w.
20. Zhang S., Huang W., Roopesh M.S., Chen L. Pre-treatment by combining atmospheric cold plasma and pH-shifting to prepare pea protein concentrate powders with improved gelling properties. *Food Research International*. 2022;154:111028. DOI: 10.1016/j.foodres.2022.111028.
21. Dong S., Guo P., Chen Y., Chen G., Ji H., Ran Y., et al. Surface modification via atmospheric cold plasma (ACP): improved functional properties and characterization of zein film. *Industrial Crops and Products*. 2018;115:124-133. DOI: 10.1016/j.indcrop.2018.01.080.
22. Bu F., Nayak G., Bruggeman P., Annor G., Ismail B.P. Impact of plasma reactive species on the structure and functionality of pea protein isolate. *Food Chemistry*. 2022;371:131135. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.131135.
23. Mahdavian Mehr H., Koocheki A. Effect of atmospheric cold plasma on structure, interfacial and emulsifying properties of Grass pea (*Lathyrus sativus* L.) protein isolate. *Food Hydrocolloids*. 2020;106:105899. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2020.105899.
24. Yu J., Chen G., Zhang Y., Zheng X., Jiang P., Ji H., et al. Enhanced hydration properties and antioxidant activity of peanut protein by covalently binding with sesbania gum via cold plasma treatment. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2021;68:102632. DOI: 10.1016/j.ifset.2021.102632.
25. Sun F., Xie X., Zhang Y., Ma M., Wang Y., Duan J., et al. Wheat gliadin in ethanol solutions treated using cold air plasma at atmospheric pressure. *Food Bioscience*. 2021;39:100808. DOI: 10.1016/j.fbio.2020.100808.
26. Sharafodin H., Soltanizadeh N. Potential application of DBD Plasma Technique for modifying structural and physicochemical properties of Soy Protein Isolate. *Food Hydrocolloids*. 2022;122:107077. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2021.107077.
27. Li Z., Deng S., Chen J. Surface modification via dielectric barrier discharge atmospheric cold plasma (DBD-ACP): improved functional properties of soy protein film. *Foods*. 2022;11(9):1196. DOI: 10.3390/foods11091196.
28. Li Q., Shen F., He X., Xing C., Yan W., Fang Y., et al. Modification of soy protein isolate using dielectric barrier discharge cold plasma assisted by modified atmosphere packaging. *Food Chemistry*. 2023;401:134158. DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.134158.
29. Venkataratnam H., Cahil O., Sarangapani C., Cullen P.J., Barry-Ryan C. Impact of cold plasma

processing on major peanut allergens. *Scientific Reports*. 2020;10:17038. DOI: 10.1038/s41598-020-72636-w.

30. Liu Z.-W., Zhou Y.-X., Wang F., Tan Y.-C., Cheng J.-H., Bekhit A.E.-D., et al. Oxidation induced by dielectric barrier discharge (DBD) plasma treatment reduces IgG/IgE binding capacity and improves the functionality of glycinin. *Food Chemistry*. 2021;363:130300. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.130300.

31. Afshar S., Ramezan Y., Hosseini S. Physical and chemical properties of oil extracted from sesame (*Sesamum indicum* L.) and sunflower (*Helianthus annuus* L.) seeds treated with cold plasma. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2022;16:740-752. DOI: 10.1007/s11694-021-01205-0.

32. Puprasit K., Wongsawaeng D., Ngaosuwan K., Kiatkittipong W., Assabumrungrat S. Non-thermal dielectric barrier discharge plasma hydrogenation for production of margarine with low *trans*-fatty acid formation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2020;66:102511. DOI: 10.1016/j.ifset.2020.102511.

33. Kongprawes G., Wongsawaeng D., Ngaosuwan K., Kiatkittipong W., Assabumrungrat S. Low-temperature and atmospheric pressure plasma for palm biodiesel hydrogenation. *Scientific Reports*. 2021;11:14224. DOI: 10.1038/s41598-021-92714-x.

34. Wang T., Li N., Luo S., Wang L., Jiang L., Yu D., et al. Catalyst activation by cold plasma technology and its effect on isomerization of safflower seed oil. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2022;76:102942. DOI: 10.1016/j.ifset.2022.102942.

35. Bulbul V.J., Bhushette P.R., Zambare R.S., Deshmukh R.R., Annature U.S. Effect of cold plasma treatment on Xanthan gum properties. *Polymer Testing*. 2019;79:106056. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2019.106056.

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

37. Sun X., Saleh A.S.M., Sun Z., Ge X., Shen H., Zhang Q., et al. Modification of multi-scale structure, physicochemical properties, and digestibility of rice starch via microwave and cold plasma treatments. *LWT*. 2022;153:112483. DOI: 10.1016/j.lwt.2021.112483.

38. Zare L., Mollakhalili-Meybodi N., Fallahzadeh H., Arab M. Effect of atmospheric pressure cold plasma (ACP) treatment on the technological characteristics of quinoa flour. *LWT*. 2022;155:112898. DOI: 10.1016/j.lwt.2021.112898.

39. Zhu H., Han Z., Cheng J.-H., Sun D.-W. Modification of cellulose from sugarcane (*Saccharum officinarum*) bagasse pulp by cold plasma: dissolution, structure and surface chemistry analysis. *Food Chemistry*. 2022;374:131675. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.131675.

40. Mehta D., Yadav K., Chaturvedi K., Shivhare U.S., Yadav S.K. Impact of cold plasma on extraction of polyphenol from de-oiled rice and corn bran: Improvement in extraction efficiency, *in vitro* digestibility, antioxidant activity, cytotoxicity and anti-inflammatory responses. *Food and Bioprocess Technology*. 2022;15:1142-1156. DOI: 10.1007/s11947-022-02801-8.

41. Silveira M.R., Coutinho N.M., Esmerino E.A., Moraes J., Fernandes L.M., Pimentel T.C., et al. Guava-flavored whey beverage processed by cold plasma technology: bioactive compounds, fatty acid profile and

volatile compounds. *Food Chemistry*. 2019;279:120-127. DOI: 10.1016/j.foodchem.2018.11.128.

42. Coutinho N.M., Silveira M.R., Fernandes L.M., Moraes J., Pimentel T.C., Freitas M.Q., et al. Processing chocolate milk drink by lowpressure cold plasma technology. *Food Chemistry*. 2019;278:276-283. DOI: 10.1016/j.foodchem.2018.11.061.

43. Beyrer M., Pina-Perez M.C., Martinet D., Andlauer W. Cold plasma processing of powdered *Spirulina* algae for spore inactivation and preservation of bioactive compounds. *Food Control*. 2020;118:107378. DOI: 10.1016/j.foodcont.2020.107378.

44. Mehta D., Yadav S.K. Impact of atmospheric non-thermal plasma and hydrothermal treatment on bioactive compounds and microbial inactivation of strawberry juice: a hurdle technology approach. *Food Science and Technology International*. 2020;26(1):3-10. DOI: 10.1177/1082013219865360.

45. Bao Y., Reddivari L., Huang J.-Y. Development of cold plasma pretreatment for improving phenolics extractability from tomato pomace. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2020;65:102445. DOI: 10.1016/j.ifset.2020.102445.

46. Bao Y., Reddivari L., Huang J.-Y. Enhancement of phenolic compounds extraction from grape pomace by high voltage atmospheric cold plasma. *LWT*. 2020;133:109970. DOI: 10.1016/j.lwt.2020.109970.

47. Rodriguez Ó., Rodrigues S., Fernandes F.A.N. Effect of glow discharge plasma technology on the phenolic content and antioxidant capacity of four tropical juices with different phenolic composition. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2022;46(1):e16110. DOI: 10.1111/jfpp.16110.

48. Qin P., Wang T., Luo Y. A review on plant-based proteins from soybean: health benefits and soy product development. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2022;7:100265. DOI: 10.1016/j.jafr.2021.100265.

49. Laroque D.A., Seo S.T., Valencia G.A., Laurindo J.B., Carciofi B.A.M. Cold plasma in food processing: design, mechanisms, and application. *Journal of Food Engineering*. 2022;312:110748. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2021.110748.

50. Okyere A.Y., Bertoft E., Annor G.A. Modification of cereal and tuber waxy starches with radio frequency cold plasma and its effects on waxy starch properties. *Carbohydrate Polymers*. 2019;223:115075. DOI: 10.1016/j.carbpol.2019.115075.

51. Oner M.E., Gultekin Subasi B., Ozkan G., Esatbeyoglu T., Capanoglu E. Efficacy of cold plasma technology on the constituents of plant-based food products: principles, current applications, and future potentials. *Food Research International*. 2023;172:113079. DOI: 10.1016/j.foodres.2023.113079.

52. Warne G.R., Williams P.M., Pho H.Q., Tran N.N., Hessel V., Fisk I.D. Impact of cold plasma on the biomolecules and organoleptic properties of foods: a review. *Journal of Food Science*. 2021;86(9):3762-3777. DOI: 10.1111/1750-3841.15856.

53. Pohl P., Dzimitrowicz A., Cyganowski P., Jamroz P. Do we need cold plasma treated fruit and vegetable juices? A case study of positive and negative changes occurred in these daily beverages. *Food Chemistry*. 2022;375:131831. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.131831.

54. Dzimitrowicz A., Jamroz P., Cyganowski P., Bielawska-Pohl A., Klimczak A., Pohl P. Application of

cold atmospheric pressure plasmas for high-throughput production of safe-to-consume beetroot juice with improved nutritional quality. *Food Chemistry*. 2021;336:127635. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127635>.

55. Sruthi N.U., Josna K., Pandiselvam R., Kothakota A.,

Gavahian M., Mousavi Khaneghah A. Impacts of cold plasma treatment on physicochemical, functional, bioactive, textural, and sensory attributes of food: a comprehensive review. *Food Chemistry*. 2022; 368:130809. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.130809.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бурак Леонид Чеславович,

кандидат технических наук,
директор,
ООО «БЕЛРОСАКВА»,
220015, г. Минск, ул. Пономаренко, 35а,
Республика Беларусь,
✉ leonidburak@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-6613-439X>

Сапач Александр Николаевич,

инженер-химик,
ООО «БЕЛРОСАКВА»,
220015, г. Минск, ул. Пономаренко, 35а,
Республика Беларусь,
sapabra7@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-8579-2689>

Завалей Андрей Петрович,

начальник испытательной лаборатории,
СООО «Ароматик»,
222720, г. Дзержинск, ул. Колхозная, 1,
Республика Беларусь,
zavaley@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-6565-5927>

Вклад авторов

Л.Ч. Бурак – концептуализация, разработка методологии исследования, научное руководство исследованием, проведение исследования, анализ и интерпретация данных, написание и редактирование текста статьи.

А.Н. Сапач – проведение исследования, верификация данных, формальный анализ, написание и редактирование текста статьи, визуализация.

А.П. Завалей – проведение исследования, валидация данных, подготовка и написание черновика рукописи, курирование данных, работа с программным обеспечением, редактирование текста статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Поступила в редакцию 26.10.2023.
Одобрена после рецензирования 03.04.2024.
Принята к публикации 31.05.2024.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Leonid Ch. Burak,

Cand. Sci. (Engineering),
Director,
BELROSAKVA Limited Liability Company,
35a, Ponomarenko St., Minsk, 220015,
Republic of Belarus,
✉ leonidburak@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-6613-439X>

Alexander N. Sapach,

Chemist,
BELROSAKVA Limited Liability Company,
35a, Ponomarenko St., Minsk, 220015,
Republic of Belarus,
sapabra7@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-8579-2689>

Andrey P. Zavaley,

Head of Testing Laboratory,
Aromatik Joint Limited Liability,
1, Kolkhoznaya St., Dzerjinsk, 222720,
Republic of Belarus,
zavaley@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-6565-5927>

Contribution of the authors

Leonid Ch. Burak – conceptualization, research methodology development, scientific supervision of the study, research conducting, data analysis and interpretation, writing and editing the manuscript.

Alexander N. Sapach – research conducting, data verification, formal analysis, manuscript creation and editing, visualization.

Andrey P. Zavalei – research conducting, data validation, preparing and writing a draft manuscript, data curation, working with software, editing the manuscript.

Conflict interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 26.10.2023.
Approved after reviewing 03.04.2024.
Accepted for publication 31.05.2024.