

Научная статья

05.18.04 – Технология мясных, молочных и рыбных продуктов и холодильных производств (технические науки)

УДК 533.9.07

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.01.010

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ХРАНЕНИЯ ПИЩЕВОЙ ПРОДУКЦИИ ПУТЕМ ОБРАБОТКИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГАЗОВОЙ ПЛАЗМОЙ

Наталья Юрьевна Москаленко¹, Сергей Леонидович Тихонов²,
Наталья Валерьевна Тихонова³, Ольга Алексеевна Кудряшова⁴,
Леонид Сергеевич Кудряшов⁵

^{1,2,3} Уральский государственный экономический университет, Екатеринбург, Россия

¹ moskalenko_nu@usue.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8204-9737>

² tihonov_75@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4863-9834>

³ tihonov_75@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5841-1791>

⁴ Всероссийский научно-исследовательский институт птицеперерабатывающей промышленности, Сергиев Посад, Россия

ccvictory@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6597-0492>

⁵ Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова, Москва, Россия

ccvictory@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5889-9176>

Аннотация. Целью исследования является разработка и оценка эффективности действия оборудования – мультиразрядного плазмотрона – для увеличения продолжительности хранения пищевой продукции с учетом механизма действия на микробную клетку. Разработанное устройство представляет собой многоступенчатый резонансный плазмотрон оригинальной конструкции, позволяющий получать одновременно различные виды плазмы, такие как плазма диэлектрического барьерного разряда, коронные разряды, дуговые разряды и атмосферные плазменные струи, с использованием различных газов и их смесей, таких как азот, кислород, гелий и аргон, а также окружающий воздух. Представленное устройство позволяет комбинировать виды и режимы воздействия низкотемпературной плазмой атмосферного давления в процессе обработки в зависимости от технологической задачи по обработке продовольственного сырья или пищевого продукта, в частности, стерилизация, пастеризация. Для оценки эффективности применения устройства сформировали две группы образцов охлажденного мяса свинины. Мясо контрольной группы низкотемпературной газовой плазмой не обрабатывали, образцы мяса опытной группы обрабатывали плазмой в течение 15 минут, поместив мясо в специальный контейнер, который заполнили ионизированным аргонном, ионизацию газа проводили разрядами частотой от 450 до 550 кГц. Установлено положительное влияние обработки охлажденного мяса низкотемпературной плазмой атмосферного давления на сохраняемость.

Ключевые слова: низкотемпературная плазма атмосферного давления, холодная плазма, генератор плазмы, аргонная плазма, мясо, срок хранения, микроорганизмы, бактерицидное действие.

Для цитирования: Разработка устройства для увеличения продолжительности хранения пищевой продукции путем обработки низкотемпературной газовой плазмой / Н.Ю. Москаленко, С.Л. Тихонов, Н.В. Тихонова и др. // Ползуновский вестник. 2021. № 1. С. 74–83. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.01.010.

DEVELOPMENT OF A DEVICE FOR INCREASING THE STORAGE DURATION OF FOOD PRODUCTS BY PROCESSING WITH LOW-TEMPERATURE GAS PLASMA

Natalia Yu. Moskalenko¹, Sergey L. Tikhonov², Natalia V. Tikhonova³,
Olga A. Kudryashova⁴, Leonid S. Kudryashov⁵

^{1, 2, 3} Ural State University of Economics, Yekaterinburg, Russia

¹ moskalenko_nu@usue.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8204-9737>

² tikhonov_75@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4863-9834>

³ tikhonov_75@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5841-1791>

⁴ All-Russian Scientific Research Institute of Poultry Processing Industry, Sergiev Posad, Russia, ccvictory@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6597-0492>

⁵ V.M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems of RAS, Moscow, Russia, ccvictory@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5889-9176>

Abstract. *The aim of the research is to develop and evaluate the effectiveness of the equipment – multi-discharge plasmatron – to increase the storage time of food products, taking into account the mechanism of action on the microbial cell. The developed device is a multistage resonant plasmatron of an original design, which allows simultaneous production of various types of plasma, such as dielectric barrier discharge plasma, corona discharges, arc discharges and atmospheric plasma jets, using various gases and their mixtures, such as nitrogen, oxygen, helium and argon; and ambient air. The presented device allows you to combine the types and modes of exposure to low-temperature plasma of atmospheric pressure during processing, depending on the technological task of processing food raw materials or food products, in particular, sterilization, pasteurization. To assess the effectiveness of the device, two groups of chilled pork samples were formed. The meat of the control group was not treated with low-temperature gas plasma, the meat samples of the experimental group were treated with plasma for 15 minutes, placing the meat in a special container, which was filled with ionized argon, gas ionization was carried out with discharges with a frequency of 450 to 550 kHz. The positive effect of the processing of chilled meat with low-temperature plasma of atmospheric pressure on the preservation has been established.*

Keywords: *low-temperature atmospheric pressure plasma, cold plasma, plasma generator, argon plasma, meat, shelf life.*

For citation: Moskalenko, N.Yu., Tikhonov, S.L., Tikhonova, N.V., Kudryashova, O.A. & Kudryashov, L.S. (2021). Development of a device for increasing the storage duration of food products by processing with low-temperature gas plasma. *Polzunovskiy vestnik*, 1,74-83. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.01.010

Пищевые продукты животного происхождения играют жизненно важную роль в питании человека благодаря своим сенсорным качествам и высокой пищевой ценности. Одной из хорошо известных проблем таких продуктов является высокая скоропортящаяся способность и ограниченный срок хранения, если не применяются соответствующие методы консервирования или обработки. Термическая обработка – это одна из хорошо зарекомендовавших себя процедур, которая наиболее часто используется для приготовления пищи и обеспечения ее безопасности.

Однако применение неадекватных или жестких термических обработок может привести к нежелательным изменениям в сенсорных и питательных свойствах продуктов термической обработки, особенно для продуктов, чувствительных к термической обработке, таких как мясо. В последние годы появились новые методы термической обработки (например, омический нагрев, микроволновая печь) и нетепловой обработки (например, высокое давление, холодная плазма), которые, как оказалось, наносят меньший ущерб каче-

ству обрабатываемых продуктов, чем традиционные методы [1].

Применение низкотемпературной плазмы атмосферного давления (НПАД) – это инновационная технология обработки пищевых продуктов, обеспечивающая эффективное снижение микробной нагрузки до безопасного уровня. Известно, что низкотемпературная плазма снижает микробную обсемененность в поверхностном слое продуктов животного происхождения [2–5].

Конечный эффект действия холодной плазмы на качество пищевых продуктов зависит от таких факторов, как макромолекулярная структура, pH и проводимость.

Существует разница между воздействием НПАД на жидкости и твердые вещества. В продуктах с высоким содержанием воды после контакта плазмы с молекулами воды происходит образование $\bullet\text{OH}$ в качестве основного реактивного соединения кислорода. Радикалы $\bullet\text{OH}$ обладают высокой реакционной способностью и при определенных значениях pH сохраняют свою активность в течение длительного времени, даже после завершения непосредственного воздействия плазмы [6, 7]. Эти стабильные радикалы ответственны за антимикробные эффекты воды в пищевых продуктах, обработанной плазмой [8–10]. Что касается продуктов питания с низким содержанием влаги, то эффект реактивных видов плазмы обычно проявляется только на поверхности, т. к. в зависимости от их состава (в основном, содержания воды) и пористости они могут проникать в продукты лишь на несколько миллиметров в глубину [11, 12].

Кроме отмеченных факторов, на проникновение плазмы в продукт оказывают влияние ее химический состав и скорость потока, т. к. период полураспада образующихся радикалов колеблется от 1 наносекунды ($\bullet\text{OH}$), 1 микросекунды ($^1\text{O}_2$, $\text{O}_2^{\bullet-}$) до 1 миллисекунды (H_2O_2), что чаще всего приводит к глубине проникновения от 1–30 нм до 1 микрона [13]. Однако небольшие глубины проникновения как раз полезны при обработке пищевых продуктов холодной плазмой, т. к. микроорганизмы, присутствующие на поверхности, становятся неактивными, в то время как чувствительные питательные вещества внутри продукта сохраняются в нативном состоянии.

На рисунке 1 дан краткий обзор основных реакций, происходящих в пищевых продуктах во время плазменной обработки. Образующиеся активные вещества реагируют на своем пути от источника плазмы к пищевой поверхности с окружающими молекулами, такими как реактивные формы кислорода

(Reactiveoxygenspecies (ROS)) и реактивные формы азота (Reactivenitrogenspecies (RNS)).

Реакция на поверхности может заключаться, во-первых, в абсорбции, во-вторых, в миграции через поверхность (2a) или, в-третьих, в спровоцированной химической реакцией с поверхностью (2b). Может также произойти удаление ROS и RNS путем десорбции, что приведет к последующей возможной рекомбинации между десорбированными и вновь образующимися активными видами после возвращения в газовую фазу (3) [14].

В связи с вышеизложенным, целью исследования является разработка и оценка эффективности мультиразрядного плазматрона для увеличения продолжительности хранения пищевой продукции с учетом механизма действия на микробную клетку.

Объекты и методы исследования

Для разработки плазматрона использовали прототип – установку по генерации низкотемпературной плазмы КБ «Плазмамед», разработанный для применения в области холодноплазменной медицины.

Материалами исследований служили состав газовой смеси, тип разряда, конфигурация электродов. Объектом исследований служили образцы охлажденной свинины, выработанной ЗАО «Уралбройлер», «Родниковский свинокомплекс» (Челябинская область, с. Миасское). Для эксперимента отбирали охлажденную длиннейшую мышцу спины свиней.

Для эксперимента сформировали две группы образцов мяса свинины ($n = 5$) массой 1500 г в каждой. Образцы мяса контрольной группы НПАД не обрабатывали, образцы мяса опытной группы обрабатывали НПАД в течение 15 минут, поместив мясо в специальный контейнер, который заполнили ионизированным аргоном [16], ионизацию газа проводили разрядами частотой от 450 до 550 кГц.

Принципиальная схема установки для обработки охлажденного мяса низкотемпературной аргоновой плазмой атмосферного давления представлена на рисунке 2.

Разряд генерировался в потоке аргона (Ar) в канале (кварцевая трубка внутренним диаметром 8 мм) между двумя игольчатыми электродами из вольфрама, заостренными на концах. Расстояние между электродами 18 мм. Скорость потока газа 0,4–0,6 м/с.

Газ (Аргон – Ar, ГОСТ 10157 – 2016 Аргон газообразный и жидкий. Технические условия) подавался из баллона объемом 10 литров. Давление в баллоне во время экс-

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ХРАНЕНИЯ ПИЩЕВОЙ ПРОДУКЦИИ ПУТЕМ ОБРАБОТКИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГАЗОВОЙ ПЛАЗМОЙ

перимента 145–135 атм. Избыточное давление в понижающем редукторе 0,1–0,2 атм. Скорость потока газа в разрядном канале регулировалась регулятором расходомера газа (LZM 1–5). Точность регулировки 0,1 л/мин.

Ионизация аргона в разрядном канале достигалась стримерными разрядами частотой 450–550 КГц. Напряжение между электродами – 12–14 Кв. Мощность режима работы высоковольтного генератора низкотемпературной аргоновой плазмой атмосферного давления в данном эксперименте – 25–30 Вт.

Источником напряжения в эксперименте являлся генератор оригинальной конструкции. Ионизированный аргон подавался по гибкой силиконовой трубке внутренним диаметром 10 мм и длиной 120 мм в контейнер объемом 3 л, в котором находился обрабатываемый образец мяса. Образец помещался в контейнер при комнатной температуре (21 °С). Температура образцов перед началом эксперимента 8 °С.

Время обработки каждого образца определялось по таймеру с точностью до 10 секунд. Перед началом отсечки времени обработки образцов низкотемпературной аргоновой плазмой атмосферного давления контейнер заполнялся ионизированным аргоном в течение примерно 2 минут. Степень замещения воздуха в контейнере ионизированным аргоном оценивалась визуально по степени наполнения полиэтиленового пакета, герметично присоединенного к выпускному патрубку контейнера, вытесненным из контейнера воздухом. После наполнения полиэтиленового пакета он отсоединялся от патрубка, и включался таймер отсчета времени обработки образца. После окончания заданного времени обработки отключалась подача аргона, герметично закрывался выходной патрубок контейнера, отсоединялась гибкая силиконовая трубка подачи аргона, герметично закрывался впускной патрубок контейнера, выключался плазмобразующий генератор.

После этого контейнеры с образцами помещались на хранение в переносной холодильник для транспортировки к месту хранения при температуре от 0 до 4 °С.

Оценку эффективности работы устройства проводили путем исследования микробной обсемененности охлажденного мяса, обработанного НПАД.

После обработки и по истечении 15 суток хранения опытные и контрольный образцы отправили на микробиологические исследования в испытательную лабораторию государственного бюджетного учреждения Свердловской области «Свердловская областная

ветеринарная лаборатория». Определяли бактерии рода *Listeria monocytogenes* по ГОСТ 32031-2012 [17], количество бактерий группы кишечных палочек (БГКП) (колиформы) по ГОСТ 31747-2012 [18], бактерии рода *Salmonella* ГОСТ 31659-2012 (ISO 6579:2002) [19], количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов (КМАФАнМ) по ГОСТ 10444.15-94 [20].

Результаты исследований

Разработанная экспериментальная установка для генерации НПАД – многорядный комбинированный плазмотрон, продуцирующий низкотемпературную плазму заданного плазмохимического состава на основе ранее разработанной установки КБ «Плазмамед» для применения в медицинских целях (патент № RU 2732218 С1 [21]). Установка представляет собой многоступенчатый резонансный плазмотрон оригинальной конструкции, позволяющий получать одновременно различные виды плазмы, такие как плазма диэлектрического барьерного разряда (DBD), коронные разряды, дуговые разряды и атмосферные плазменные струи, с использованием различных газов и их смесей, таких как азот, кислород, гелий и аргон, а также окружающий воздух. Разработанная установка позволяет комбинировать виды и режимы воздействия НПАД в процессе обработки в очень широких пределах в зависимости от технологической задачи по обработке парного и охлажденного мяса.

В работе использована установка для генерации НПАД в разных условиях (состав газовой смеси, тип разряда, конфигурация электродов, температура, время воздействия и т. д.). За счет применения в одном приборе нескольких видов высокочастотного электромагнитного продуцирования плазмы удалось существенно упростить и в перспективе удешевить стоимость готового устройства, автоматизировать режимы его работы.

Конструктивные решения представляемого устройства позволяют одновременно производить взаимозависимые обработки мяса и упаковки низкотемпературной плазмой атмосферного давления заданного плазмохимического состава и заданных физических характеристик.

На рисунке 3 показана принципиальная схема устройства. Предлагаемая схема плазматрона представляет из себя серию последовательных разрядников, связанных между собой посредством высокочастотных резонансных трансформаторов с управлени-

ем посредством положительной и отрицательной обратной связи. Это позволяет произвольно использовать производство различных комбинаций НПАД с оптимальными характеристиками состава ROS и RNS, образующихся в результате диссоциации газообразных молекул во время генерации плазмы, в зависимости от технологических требований обработки.

Проведена оценка эффективности разработанного оборудования для увеличения продолжительности хранения пищевой продукции на примере охлажденного мяса. Уста-

новлено положительное влияние обработки охлажденного мяса НПАД на сохраняемость.

В таблице 1 представлены микробиологические показатели охлажденного мяса через 15 суток хранения.

Так, образцы мяса контрольной группы через 15 суток хранения по микробиологическим показателям не соответствовали требованиям ТР ТС 034/2013 [22]. КМАФАнМ контрольной группы составило $5,6 \times 10^7$ КОЕ/г и обнаружены колиформы, в опытной группе – $1,1 \times 10^3$ КОЕ/г, БГКП не обнаружены.

Таблица 1 – Микробиологические показатели охлажденного мяса через 15 суток хранения

Table 1 – Microbiological indicators of chilled meat after 15 days of storage

Группа	Наименование показателя			
	КМАФАнМ, не более, КОЕ/г	БГКП (колиформы), не допускаются в массе продукта, г	Бактерии рода <i>Salmonella</i> , не допускаются в массе продукта, г	<i>Listeriamonocytogenes</i> , не допускаются в массе продукта, г
	Требования ТР ТС 034/2013 «О безопасности мяса и мясной продукции»			
1 группа (контроль)	$5,6 \cdot 10^7$	Обнаружены	Не обнаружены	Не обнаружены
2 опытная группа	$1,1 \cdot 10^3$	Не обнаружены	Не обнаружены	Не обнаружены

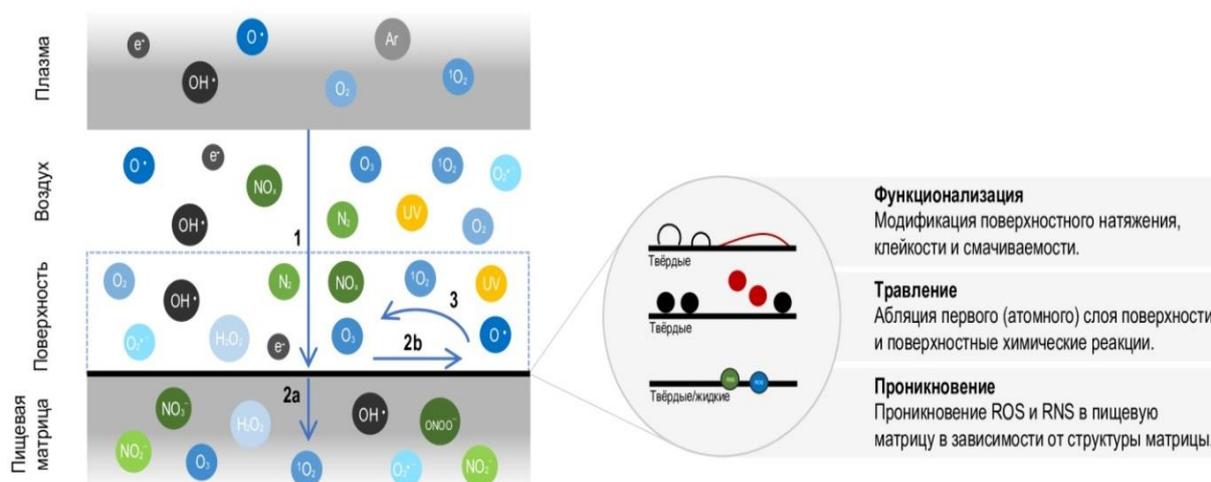


Рисунок 1 – Схема отдельных воздействий холодной плазмы на твердые и жидкие пищевые системы. Адаптировано из работы Surowskyetal., 2016 [15]

Figure 1 – Scheme of individual effects of cold plasma on solid and liquid food systems. Adapted from Surowskyetal., 2016 [15]

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ХРАНЕНИЯ ПИЩЕВОЙ ПРОДУКЦИИ ПУТЕМ ОБРАБОТКИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГАЗОВОЙ ПЛАЗМОЙ

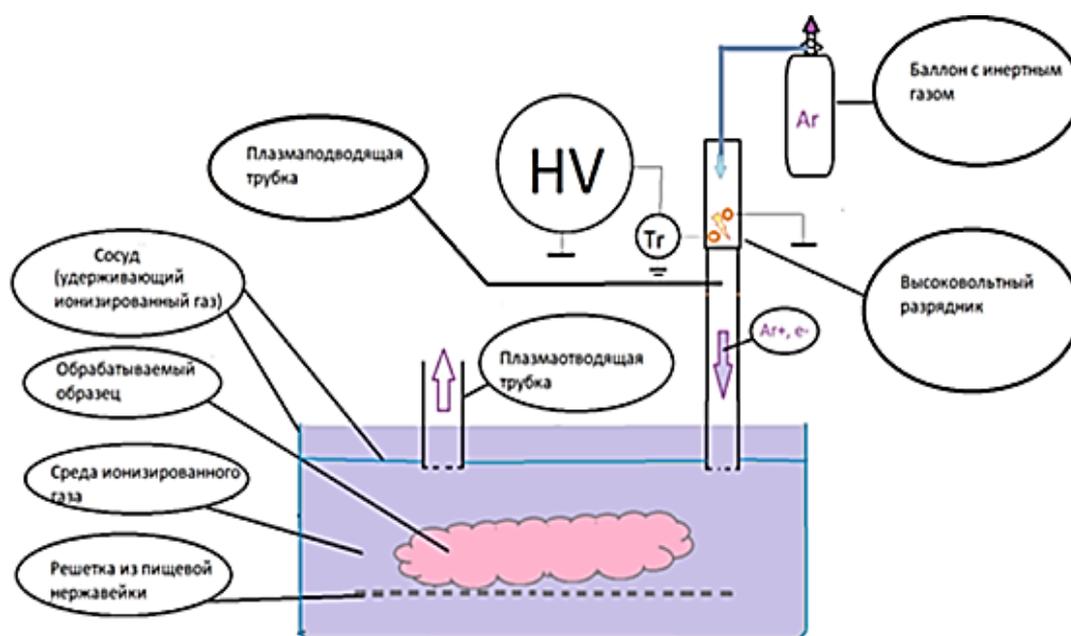


Рисунок 2 – Принципиальная схема обработки пищевой продукции НПАД

Figure 2 – Schematic diagram of food processing by NPAD

На рисунке 4 представлен механизм действия НПАД на микробную клетку, реализованный в нашем эксперименте.

Известно, что ROS, включая синглетный кислород 1O_2 , гидроксил радикал $\cdot OH$, гидропероксил радикал $HO_2\cdot$, супероксидный анион-радикал $\cdot OO^-$, пероксид водорода HO_2H

и озон O_3 и RNS – оксид азота $NO\cdot$, радикал диоксида азота $\cdot NO_2$, пероксинитрит $ONOO^-$, пероксинитрозную кислоту $OONOH$ в плазме обладают антимикробными свойствами. ROS и RNS в НПАД действуют через различные механизмы на грамположительные и грамотрицательные бактерии.

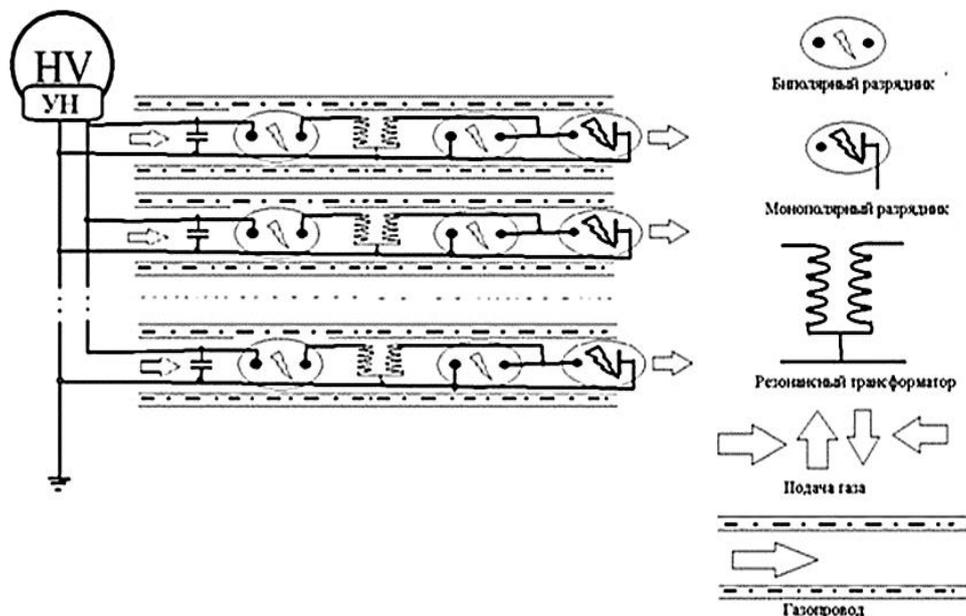


Рисунок 3 – Принципиальная схема устройства для увеличения продолжительности хранения пищевой продукции путем обработки низкотемпературной газовой плазмой

Figure 3 – Schematic diagram of a device for increasing storage duration food products by processing with low-temperature gas plasma

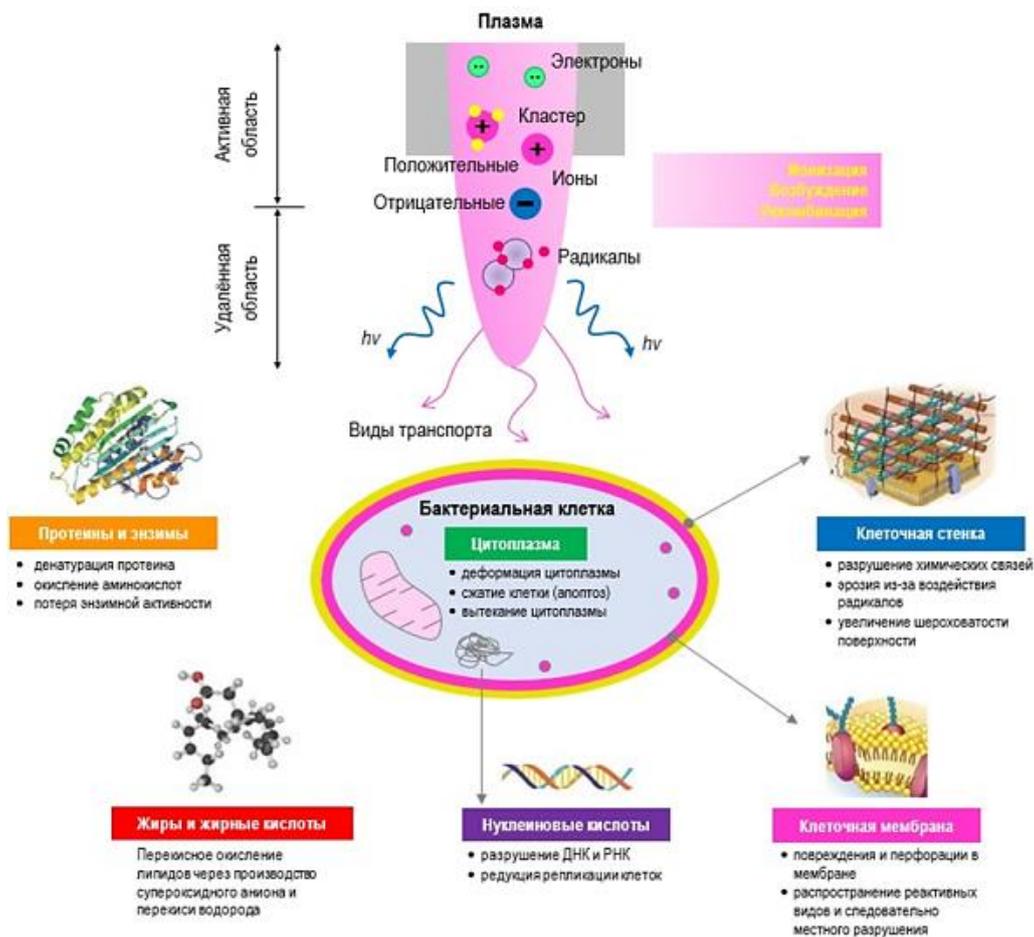


Рисунок 4 – Механизм действия НПАД на микробную клетку, реализованный в эксперименте

Figure 4 – The mechanism of action of NPAD on a microbial cell, realized in the experiment

Эффективность обработки мяса НПАД объясняется комплексным действием компонентов НПАД на клетки микроорганизмов, усиливаются микробицидные эффекты холодной плазмы на бактерии, что, по-видимому, является главным образом результатом окислительного повреждения внутриклеточных компонентов, в частности ДНК [23].

Также ROS эффективно действуют и разрушают клеточные стенки бактерий, расщепляя С–О, С–Н и С–С связи пептидогликанов и окисляя липиды в липополисахаридах. Бактерицидные эффекты воздействия НПАД связаны с разрушением клеточной стенки через окислительное повреждение.

Заключение

В результате проведенных исследований разработан многоразрядный комбинированный плазмотрон, продуцирующий низко-

температурную плазму заданного плазмохимического состава для обработки пищевой продукции.

Плазмотрон позволяет получать различные виды плазмы (плазма диэлектрического барьерного разряда, коронные разряды, дуговые разряды и атмосферные плазменные струи) с использованием различных газов и комбинировать виды и режимы воздействия низкотемпературной газовой плазмы атмосферного давления в процессе обработки мясopодуKтов. В установке обеспечивается регуляция интенсивности обработки, времени экспозиции с учетом химического состава пищевых продуктов, в частности, содержания влаги.

Эффективность разработанного устройства доказана в эксперименте по исследованию продолжительности хранения охлажденного мяса, обработанного НПАД на спроектированном устройстве.

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ХРАНЕНИЯ ПИЩЕВОЙ ПРОДУКЦИИ ПУТЕМ ОБРАБОТКИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГАЗОВОЙ ПЛАЗМОЙ

В результате исследований установлено, что обработка НПАД охлажденного мяса существенно снижает микробную обсемененность. В контрольных образцах, необработанных НПАД, микробное обсеменение превышает установленные требованиями ТР ТС 034/2013, также в контрольных (необработанных) образцах обнаружены колиформы, что не допускается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hassoun A. Monitoring thermal and non-thermal treatments during processing of muscle foods: A comprehensive review of recent technological advances / A. Hassoun, S. Ojha, B. Tiwari, T. Rustad, H. Nilsen, K. Heia, D. Cozzolino, A. El-Din Bekhit, A. Biancolillo, J.P. Wold, // *Applied Sciences (Switzerland)* – 2020. – № 10 (19). – Article № 6764.
2. Rossow M. Effect of cold atmospheric pressure plasma treatment on inactivation of *Campylobacter jejuni* on chicken skin and breast fillet / M. Rossow, M. Ludewig, P.G. Braun // *LWT – Food Science and Technology*. – 2018. – № 91. – P. 265–270.
3. Rothrock Jr.M.J. In-package inactivation of pathogenic and spoilage bacteria associated with poultry using dielectric barrier discharge-cold plasma treatments / M.J.Jr. Rothrock, H. Zhuang, K.C. Lawrence, B.C. Bowker, G.R. Gamble, K.L. Hiatt // *Current Microbiology*. – 2017. – № 74 (2). – P. 149–158.
4. Roh S.H. Effects of the treatment parameters on the efficacy of the inactivation of *Salmonella* contaminating boiled chicken breast by in-package atmospheric cold plasma treatment / S.H. Roh, S.Y. Lee, H.H. Park, E.S. Lee, S.C. Min // *International Journal of Food Microbiology*. – 2019. – № 293. – P. 24–33.
5. Zhuang H. In-package antimicrobial treatment of chicken breast meat with high voltage dielectric barrier discharge–electric voltage effect / H. Zhuang, M.J.Jr. Rothrock, K.L. Hiatt, K.C. Lawrence, G.R. Gamble, B.C. Bowker, K.M. Keener // *Journal of Applied Poultry Research*. – 2019. – № 28 (4). – P. 801–807.
6. Zhang R. Bacterial decontamination of water by bipolar pulsed discharge in a gas-liquid-solid three-phase discharge reactor / R. Zhang, L. Wang, Y. Wu, Z. Guan, Z. Jia // *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 2006. – № 34 (4). – P. 1370–1374.
7. Ikawa S. Effects of pH on bacterial inactivation in aqueous solutions due to low-temperature atmospheric pressure plasma application / S. Ikawa, K. Kitano, S. Hamaguchi // *Plasma Processes and Polymers*. – 2010. – № 7 (1). – P. 33–42.
8. Traylor M.J. Long-term antibacterial efficacy of air plasma-activated water / M.J. Traylor, M.J. Pavlovich, S. Karim, P. Hait, Y. Sakiyama, D.S. Clark, D.B. Graves // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2011. – № 44 (47). – Article № 472001.
9. Ercan U.K. Nonequilibrium plasma-activated antimicrobial solutions are broad-spectrum and retain their efficacies for extended period of time / U.K. Ercan, H. Wang, H. Ji, G. Fridman, A.D. Brooks, S.G. Joshi //

Plasma Processes and Polymers. – 2013. – № 10 (6). – P. 544–555.

10. Zhang Q. A study of oxidative stress induced by non-thermal plasma-activated water for bacterial damage / Q. Zhang, Y. Liang, H. Feng, R. Ma, Y. Tian, J. Zhang, J. Fang // *Applied Physics Letters*. – 2013. – № 102 (20). – Article № 203701.

11. Xiong Z. How deep can plasma penetrate into a biofilm / Z. Xiong, T. Du, X. Lu, Y. Cao, Y. Pan // *Applied Physics Letters*. – 2011. – № 98. – Article № 221503.

12. Pei X. Inactivation of a 25.5 µm *Enterococcus faecalis* biofilm by a room-temperature, battery-operated, handheld air plasma jet / X. Pei, X. Lu, J. Liu, D. Liu, Y. Yang, K. Ostrikov, P.K. Chu, Y. Pan // *Journal of Physics D: Applied Physics* – 2012. – № 45 (16). – Article № 165205.

13. Moller I.M. Oxidative modifications to cellular components in plants / I.M. Moller, P.E. Jensen, A. Hansson // *Annual Review of Plant Biology*. – 2007. – № 58 (1). – P. 459–481.

14. D'angelo D. Plasma-surface interaction. In: *Plasma Technology for Hyperfunctional Surfaces: Food, Biomedical and Textile Applications* / H. Rauscher, M. Perucca, G. Buyle, (Eds.) // Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. – 2010. – P. 63–77.

15. Surowsky B. Chapter 7 – Cold plasma interactions with food constituents in liquid and solid food matrices. In: *Cold Plasma in Food and Agriculture* / B. Surowsky, S. Bußler, O.K. Schlüter // Academic Press, San Diego. – 2016. – P. 179–203.

16. ГОСТ 10157–2016. Аргон газообразный и жидкий. Технические условия – Введ. 2017–07–01. – М. : Стандартинформ, 2019. – 23 с.

17. ГОСТ 32031-2012 Продукты пищевые. Методы выявления бактерий *Listeria monocytogenes*. – Введ. 2014–07–01. – М. : Стандартинформ, 2014. – 29 с.

18. ГОСТ 31747-2012 Продукты пищевые. Методы выявления и определения количества бактерий группы кишечных палочек (колиформных бактерий) – Введ. 2013–07–01. – М. : Стандартинформ, 2013. – 20 с.

19. ГОСТ 31659-2012 Продукты пищевые. Метод выявления бактерий рода *Salmonella*. – Введ. 2013–07–01. – М. : Стандартинформ, 2014. – 20 с.

20. ГОСТ 10444.15–94. Продукты пищевые. Методы определения количества мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов. – Введ. 1996–01–01. – М. : Стандартинформ, 2010. – 7 с.

21. Устройство для обработки ран и остановки кровотечений с применением низкотемпературной плазмы атмосферного давления: пат. 2732218 Рос. Федерация № 2019134463 ; заявл. 24.10.2019; опубл. 14.09.2020, Бюл. № 26. – 2 с.

22. ТР ТС 034/2013 Технический регламент Таможенного союза «О безопасности мяса и мясной продукции» [принят решением Совета Евразийской экономической комиссии от 9 октября 2013 года № 68]. – Доступ из информационной сети «Техэксперт». – Текст : электронный.

23. Misra N.N. Applications of cold plasma technology for microbiological safety in meat industry / N.N. Misra, C. Jo // Trends in Food Science & Technology Elsevier Ltd. – 2017. – № 64. – P. 74–86.

Информация об авторах

Н. Ю. Москаленко – аспирант 2 курса кафедры пищевой инженерии Уральского государственного экономического университета.

С. Л. Тихонов – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой пищевой инженерии Уральского государственного экономического университета.

Н. В. Тихонова – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры пищевой инженерии Уральского государственного экономического университета.

О. А. Кудряшова – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института птицеперерабатывающей промышленности – филиал ФНЦ «ВНИИПП» РАН (ВНИИПП).

Л. С. Кудряшов – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБНУ ФНЦ Пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН.

REFERENCES

1. Hassoun, A., Ojha, S., Tiwari, B., Rustad, T., Nilsen, H., Heia, K., Cozzolino, D., El-Din Bekhit, A., Biancolillo & A., Wold, J.P. (2020). Monitoring thermal and non-thermal treatments during processing of muscle foods: A comprehensive review of recent technological advances // Applied Sciences (Switzerland). – 10 (19). – Article № 6764.
2. Rossow, M, Ludewig, M. & Braun, P.G. (2018). Effect of cold atmospheric pressure plasma treatment on inactivation of *Campylobacter jejuni* on chicken skin and breast fillet. LWT // Food Science and Technology. – (91). – 265–270.
3. Rothrock, Jr.M.J., Zhuang, H., Lawrence, K.C., Bowker, B.C., Gamble, G.R. & Hiatt, K.L. (2017). In-package inactivation of pathogenic and spoilage bacteria associated with poultry using dielectric barrier discharge-cold plasma treatments // Current Microbiology. – 74 (2). – 149–158.
4. Roh, S.H., Lee, S.Y., Park, H.H., Lee, E.S. & Min, S.C. (2019). Effects of the treatment parameters on the efficacy of the inactivation of *Salmonella* contaminating boiled chicken breast by in-package atmospheric cold plasma treatment // International Journal of Food Microbiology. – (293). – 24–33.
5. Zhuang, H., Rothrock, M.J.Jr., Hiatt, K.L., Lawrence, K.C., Gamble, G.R., Bowker, B.C. & Keener, K.M. (2019). In package antimicrobial treatment of chicken breast meat with high voltage dielectric barrier discharge – electric voltage effect // Journal of Applied Poultry Research. – 28 (4). – 801–807.

6. Zhang, R., Wang, L., Wu, Y., Guan, Z. & Jia, Z. (2006). Bacterial decontamination of water by bipolar pulsed discharge in a gas-liquid-solid three-phase discharge reactor // IEEE Transactions on Plasma Science. – 34 (4). – 1370–1374.

7. Ikawa, S., Kitano, K. & Hamaguchi, S. (2010). Effects of pH on bacterial inactivation in aqueous solutions due to low-temperature atmospheric pressure plasma application // Plasma Processes and Polymers. – 7 (1). – P. 33–42.

8. Traylor, M.J., Pavlovich, M.J., Karim, S., Hait, P., Sakiyama, Y., Clark, D.S. & Graves, D.B. (2011). Longterm antibacterial efficacy of air plasma-activated water // Journal of Physics D : Applied Physics. – 44 (47). – Article № 472001.

9. Ercan, U.K., Wang, H., Ji, H., Fridman, G., Brooks, A.D. & Joshi S.G. (2013). Nonequilibrium plasma-activated antimicrobial solutions are broad-spectrum and retain their efficacies for extended period of time // Plasma Processes and Polymers. – 10 (6), 544–555.

10. Zhang, Q., Liang, Y., Feng, H., Ma, R., Tian, Y., Zhang, J. & Fang, J. (2013). A study of oxidative stress induced by non-thermal plasma-activated water for bacterial damage // Applied Physics Letters. – 102 (20). – Article № 203701.

11. Xiong, Z., Du, T., Lu, X., Cao, Y. & Pan, Y. (2011). How deep can plasma penetrate into a biofilm // Applied Physics Letters. – (98). – Article № 221503.

12. Pei, X., Lu, X., Liu, J., Liu, D., Yang, Y., Ostrikov, K., Chu, P.K. & Pan Y. (2012). Inactivation of a 25.5 μm *Enterococcus faecalis* biofilm by a room-temperature, battery-operated, handheld air plasma jet // Journal of Physics D: Applied Physics. – 45 (16). – Article № 165205.

13. Moller, I.M., Jensen, P.E. & Hansson, A. (2007). Oxidative modifications to cellular components in plants // Annual Review of Plant Biology. – 58 (1). – 459–481.

14. D'angelo, D. (2010). Plasma-surface interaction. H. Rauscher, M. Perucca, G. Buyle (Eds.) Plasma Technology for Hyperfunctional Surfaces: Food, Biomedical and Textile Applications (P. 63–77). Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. doi.org/10.1002/9783527630455.ch3.

15. Surowsky, B., Bußler, S. & Schlüter O.K. (2016). Chapter 7 – Cold plasma interactions with food constituents in liquid and solid food matrices. In: Cold Plasma in Food and Agriculture (P. 179–203) San Diego: Academic Press.

16. Interstate council for standardization, metrology and certification. (2019). Argon is gaseous and liquid. Technical specifications (HOST № 10157-2016). Retrieved from <http://docs.cntd.ru/document/554607931>.

17. Interstate council for standardization, metrology and certification. (2014). Food products. Methods for detecting *Listeria monocytogenes* bacteria (HOST № 32031–2012). Retrieved from <http://docs.cntd.ru/document/1200105310>.

18. Interstate council for standardization, metrology and certification. (2013). Food products. Methods for detecting and determining the number of bacteria of the *Escherichia coli* group (coliform bacteria).

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ХРАНЕНИЯ ПИЩЕВОЙ ПРОДУКЦИИ ПУТЕМ ОБРАБОТКИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГАЗОВОЙ ПЛАЗМОЙ

(HOST 31747-2012). Retrieved from <http://docs.cntd.ru/document/1200098583>.

19. Interstate council for standardization, metrology and certification. (2013). Food products. Method for detection of bacteria of the genus Salmonella (HOST 31659-2012). Retrieved from <http://docs.cntd.ru/document/1200098239>.

20. Interstate council for standardization, metrology and certification. (1996). Food products. Methods for determining the number of mesophilic aerobic and facultative anaerobic microorganisms (HOST 10444.15-94). Retrieved from – <http://docs.cntd.ru/document/1200022648>.

21. Device for treating wounds and stopping bleeding with the use of low-temperature plasma of atmospheric pressure. (2019). *Patent RU 2732218C1 IPC A61B 18/04 (2006.01) Application: 2019134463, 24.10.2019.*

22. Council of the Eurasian economic commission. Technical Regulations of the Customs Union «On the safety of meat and meat products». (TR CU 034/2013). Retrieved from <http://docs.cntd.ru/document/499050564>.

23. Misra, N.N. & Jo C. (2017). Applications of cold plasma technology for microbiological safety in

meat industry // Trends in Food Science & Technology Elsevier Ltd, (64). – 74–86.

Information about the authors

N. Yu. Moskalenko – 2nd year postgraduate student of the Department of Food Engineering of the Ural State University of Economics.

S. L. Tikhonov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Food Engineering of the Ural State University of Economics.

N. V. Tikhonova – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Food Engineering of the – Ural State University of Economics.

O. A. Kudryashova – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of the All-Russian Scientific Research Institute of Poultry Processing Industry.

L. S. Kudryashov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the V.M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems of RAS.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 21.01.2021; одобрена после рецензирования 12.02.2021; принята к публикации 17.02.2021.

The article was received by the editorial board on 21 Jan 21; approved after reviewing on 12 Feb 21; accepted for publication on 17 Feb 21.