

Актуальные проблемы развития пищевых и биотехнологий

Topical issues of development of food and biological technologies

Научная статья
УДК 333.1
DOI: 10.14529/food230201

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ЭКОТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР

Н.В. Науменко, naumenkonv@susu.ru

М. Шемек, shemekm@susu.ru

Р.И. Фаткуллин, fatkullinri@susu.ru

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Применение холодного плазменного излучения как ресурсосберегающей технологии для обеззараживания зерновых культур, плодов, овощей и отдельных сырьевых ингредиентов является перспективным направлением развития пищевой промышленности. Данный тип воздействия имеет низкую температуру свечения плазмы (<50 °С), а благодаря образованию квазинейтрального «моря» электронов, ионов, реактивных и нейтральных молекул, активных форм кислорода, УФ-фотонов, молекул азота атомарного кислорода, супероксида, гидроксильных радикалов, оксида азота, перекиси водорода и других веществ имеет высокую эффективность обеззараживающего действия. В настоящее время можно выделить наиболее эффективно применяемые для обработки пищевых продуктов методы генерации плазмы: диэлектрический барьерный разряд, атмосферная плазменная струя, коронный разряд, радиочастотная плазма и микроволновый разряд. Представленные в открытых источниках исследования показывают, что создание эффективных технологий обеззараживания путем воздействия холодного плазменного излучения требует индивидуального подхода для каждого вида продукта, а также должно учитывать присутствие его начальной микрофлоры, влажность и структуру поверхности. В данной технологии возможен широкий выбор метода генерации плазмы, создания активных молекул и ионов, длительности воздействия и конструкции технологических линий, что дает возможность производителям внедрять в производственный процесс инновационные технологии с учетом финансовых возможностей предприятия. Таким образом, интерес к разработкам в области внедрения ресурсосберегающих экотехнологий переработки зерновых культур на основе холодного плазменного излучения весьма актуален, так как позволяет создать безопасную пищевую систему и сохранить все полезные свойства биологических объектов.

Ключевые слова: холодное плазменное излучение, коронный разряд, обеззараживание, сохранение пищевого сырья

Благодарности. Статья выполнена при финансовой поддержке программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030», в рамках реализации стратегического проекта № 3, подпроект «Экотехнологии ресурсосбережения для АПК».

Для цитирования: Науменко Н.В., Шемек М., Фаткуллин Р.И. Ресурсосберегающие экотехнологии переработки зерновых культур // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». 2023. Т. 11, № 2. С. 5–10. DOI: 10.14529/food230201

© Науменко Н.В., Шемек М., Фаткуллин Р.И., 2023

Original article
DOI: 10.14529/food230201

RESOURCE-SAVING ECO-TECHNOLOGIES FOR PROCESSING GRAIN CROPS

N.V. Naumenko, *naumenkonv@susu.ru*

M. Shemek, *shemekm@susu.ru*

R.I. Fatkullin, *fatkullinri@susu.ru*

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The use of cold plasma radiation as a resource-saving technology for the disinfection of grain crops, fruits, vegetables and individual raw ingredients is a promising direction in the development of the food industry. This type of exposure has a low temperature (<50 °C) of the plasma glow, and due to the formation of a quasi-neutral “sea” of electrons, ions, reactive and neutral molecules, reactive oxygen species, UV photons, nitrogen molecules of atomic oxygen, superoxide, hydroxyl radicals, oxide nitrogen, hydrogen peroxide and other substances has a high efficiency of disinfecting action. At present, the methods of plasma generation most effectively used for food processing can be distinguished: dielectric barrier discharge, atmospheric plasma jet, corona discharge, radio frequency plasma and microwave discharge. The studies presented in open sources show that the creation of effective disinfection technologies by exposure to cold plasma radiation requires an individual approach for each type of product, and must also take into account the presence of its initial microflora, humidity and surface structure. In this technology, a wide choice of the method of plasma generation, creation of active molecules and ions, the duration of exposure and the design of technological lines is possible, which enables manufacturers to introduce innovative technologies into the production process, taking into account the financial capabilities of the enterprise. Thus, interest in developments in the field of introducing resource-saving eco-technologies for processing grain crops based on cold plasma radiation is very relevant, as it allows you to create a safe food system and preserve all the useful properties of biological objects.

Keywords: cold plasma radiation, corona discharge, disinfection, preservation of food raw materials

Acknowledgments. The article was financially supported by the program of strategic academic leadership «Priority-2030», within the framework of the implementation of the strategic project No. 3, subproject «Eco-technologies for resource saving for the agro-industrial complex».

For citation: Naumenko N.V., Shemek M., Fatkullin R.I. Resource-saving eco-technologies for processing grain crops. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnology*, 2023, vol. 11, no. 2, pp. 5–10. (In Russ.) DOI: 10.14529/food230201

Обеззараживание зерновых культур и сырьевых ингредиентов растительного происхождения с целью сохранения их качества и безопасности является первостепенной задачей пищевой промышленности. В настоящее время в данном направлении в пищевой индустрии существует множество технологий, основанных на использовании химических веществ. Данные технологии инактивации патогенной микрофлоры эффективны, но имеют ряд ограничительных факторов, так как всегда присутствует вероятность их попадания в конечные пищевые продукты. Воздействие высоких температур с целью обеззараживания

влечет за собой снижение пищевой ценности сырья и не применимо для свежих овощей и фруктов. Физические методы обеззараживания, такие как высокое гидростатическое давление, ультрафиолетовое и, ионизирующее излучение и др., обладают высокой эффективностью, но их применение ограничивается определенными видами пищевых продуктов, высоким потреблением энергии, использованием дорогостоящего оборудования и временными затратами [1, 2].

В настоящее время рядом исследователей [3, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 15, 21, 22] предлагается использование высокоэффективной ресур-

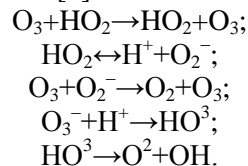
соберегающей экотехнологии на основе холодного плазменного излучения. Благодаря низкой температуре свечения плазмы (<50 °С) данный метод воздействия может использоваться для большого диапазона пищевых продуктов.

Холодная плазма представляет собой электропроводящее квазинейтральное «море» электронов, ионов, реактивных и нейтральных молекул [5]. Использование газовых смесей различного состава может позволить сформировать образование определенных химически активных атомов и молекул, таких как активный кислород, УФ-фотоны, молекулы азота и др. [20]. Так, например, присутствие повышенного содержания кислорода в воздухе может привести к образованию атомарного кислорода, супероксида, гидроксильных радикалов, оксида азота, перекиси водорода и других веществ, которые, как доказано, обладают обеззараживающим действием [15].

Химия образования плазмы – это сложный многоаспектный процесс, включающий в себя множество химических реакций. Её взаимодействие с поверхностью пищевых продуктов может быть описано более чем 75 реакциями. Данный метод воздействия эффективен для разрушения большинства органических связей на поверхности продукта, таких как С–Н, С–С, С=С, С–О и С–N. При

этом активные формы кислорода (O_2^+ , O_2^- , O_3 , O , O^+ и O^- , ионизированный озон и свободные электроны), образуемые в плазме, имеют второе обеззараживающее действие.

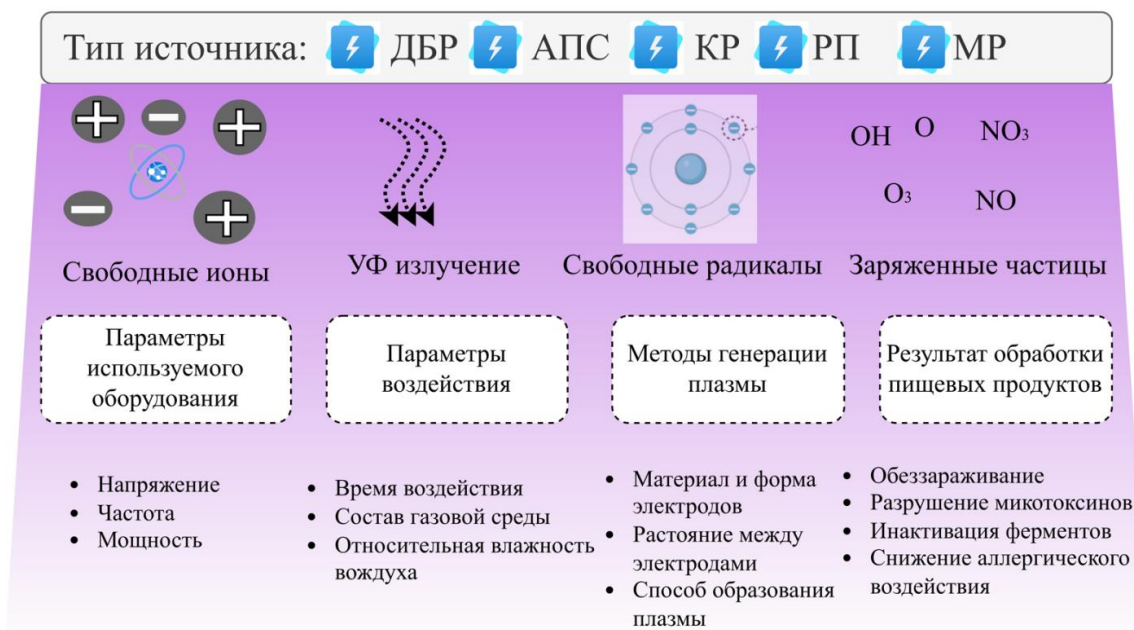
Свободные радикалы приводят к образованию H_2O , CO , CO_2 с загрязнениями органической природы, при этом протекают следующие реакции [7]:



Холодная плазма инактивирует патогенную микрофлору с поверхности обрабатываемых пищевых продуктов с помощью двух основных факторов воздействия. Во-первых, это химические реакции между радикалами, реактивными или заряженными частицами с клеточными мембранами микроорганизмов. Во-вторых, воздействие УФ-излучения, которое повреждает мембраны и внутренние клеточные элементы, также вызывает разрыв цепей ДНК, что приводит к гибели микроорганизмов. Наиболее эффективным является сочетание нескольких вышеописанных обеззараживающих механизмов [9, 13].

Методы генерации плазмы, наиболее применяемые для обработки пищевых продуктов, подразделяются на диэлектрический барьер-

Холодная плазма



Обобщенная схема параметров получения холодного плазменного излучения [4]

Характеристика разработок в области применения холодной плазмы для обеззараживания
 зерновых культур, плодов и овощей*

Обрабатываемое сырьё	Тип ХП и параметры воздействия	Инактивируемая микрофлора / насекомые	Источник
Зерно пшеницы, нута, фасоли, ячменя, овса, сои, чечевицы, кукурузы, ржи	АПС: 20 кВ, 300 Вт, 1 кГц, 5–20 минут	<i>Aspergillus spp.</i> , <i>Penicillin spp.</i>	Selcuk [18]
Мука пшеничная сортовая	ДБР: 50 Гц, 1–2,5 кВ, 1–5 минут	<i>Tribolium castaneum</i>	Mahendran [11]
Мука пшеничная цельно-смолотая	ДБР: 60–70 кВ, 5–10 минут	<i>Penicillin spp.</i>	Misra [12]
Рисовый крахмал	РП: 40–60 Вт, 13,56 МГц, 5–10 минут	<i>Penicillin spp.</i>	Thirumdas, 2017 [22]
Коричневый рис	РП: 40–50 Вт, 13,56 МГц, 5–10 минут	<i>Bacillus cereus</i>	Thirumdas, 2016 [21]
	ДБР: 250 Вт, 15 кГц, 5–20 минут	<i>E. coli O157:H7</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus cereus</i>	Lee [10]
Зерно пшеницы, ячменя, овса	КР: 8–15 кВ, 100 Гц, 10–30 секунд	<i>Aspergillus candidus</i> , <i>Fusarium spp</i> , <i>Penicillium spp.</i>	Потороко [3]
Яблоки	ДБР: 150 Вт, 12,7 кГц, 120 мин	<i>E. coli O157:H7</i>	Ramazzina [17]
	АПС: 15 кВ, 60 Гц, 3 мин	<i>Salmonella Stanley and E. coli O157:H7</i>	Niemira [14]
	РП: 40 Гц, 36 кВ, 5 мин	<i>L. monocytogenes</i>	Ukuku [23]
Манго, дыни	АПС: 12–16 кВ, 30 кГц, 1 мин	<i>Pantoea agglomerans</i> , <i>E. coli</i> , <i>Saccharomyces cerevisiae</i> , <i>Gluconacetobacter liquefaciens</i>	Perni [15]
Арахис	РП: 60 Вт, 13,56 МГц	<i>Aspergillus parasiticus</i> , <i>Aspergillus flavus</i>	Devi [6]
Миндаль	КР: 20 кВ, 15 кГц, 15 мин	<i>Salmonella</i>	Hertwig [8]
Помидоры	ДБР: 15 Гц, 60 кВ, 5–30 мин	<i>E. coli ATCC 25,922</i>	Prasad [16]
Капуста	МР: 400–900 Вт, 667 кПа, 1–10 мин	<i>L. monocytogenes</i>	Lee [10]

*ДБР – диэлектрический барьерный разряд, АПС – атмосферная плазменная струя, КР – коронный разряд, РП – радиочастотная плазма, МР – микроволновый разряд.

ный разряд (ДБР), атмосферную плазменную струю (АПС) [19], коронный разряд (КР) [3], радиочастотную плазму (РП) и микроволновый разряд (МР) (см. рисунок) [4].

Значительное число научных работ (см. таблицу) посвящено исследованиям в данной области, что указывает на его привлекательность для реального сектора производства.

Эффективное обеззараживание зерновых культур и сырьевых ингредиентов на их осно-

ве – достаточно сложно реализуемая задача, обусловленная развитой поверхностью биологических объектов и их малым размером. Необходимо отметить, что рядом исследований, приведенных в таблице, подтверждена инактивация *Aspergillus spp.*, *Fusarium spp*, *Penicillium spp.* при использовании АПС, ДБР, РП и КР. Представленные в открытой печати базы данных Scopus и WoS [3, 6, 10, 11, 12, 21, 22], параметры воздействия холодного

плазменного излучения указывают, что длительность эффективного процесса обеззараживания для зерновых культур должна составлять 5–20 минут, тогда как современные российские разработки [3] позволяют сократить данную характеристику до 10–30 секунд, что значительно снижает затраты производителей на проведение данного процесса.

Представленные исследования показывают, что создание эффективных технологий обеззараживания путем воздействия холодного плазменного излучения требует индивидуального подхода для каждого вида продукта, а также должно учитывать присутствие его начальную микрофлору, влажность и структуру

поверхности. В данной технологии возможен широкий выбор метода генерации плазмы, создания активных молекул и ионов, длительности воздействия и конструкции технологических линий, что дает возможность производителям внедрять в производственный процесс инновационные технологии с учетом финансовых возможностей предприятия.

Таким образом, интерес к разработкам в области внедрения ресурсосберегающих экотехнологий переработки зерновых культур на основе холодного плазменного излучения весьма актуален, так как позволяет создать безопасную пищевую систему и сохранить все полезные свойства биологических объектов.

Список литературы / References

1. Афлотоксины зерна и способы минимизации рисков их накопления / Н.В. Науменко, И.Ю. Потороко, А.В. Малинин и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». 2019. Т. 7, № 2. С. 7080. [Naumenko N.V., Potoroko I.Yu., Malinin A.V., Tsaturov A.V., Nazarova O.D. Grain Aflatoxins and Ways to Minimize Risks of Their Accumulation. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnology*, 2019, vol. 7, no. 2, pp. 70–80. (In Russ.)] DOI: 10.14529/food190208
2. Применение нетепловых методов обеззараживания растительного сырья в производстве пищевых продуктов / Н.В. Науменко, И.Ю. Потороко, Н.В. Попова, и др. // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2019. Т. 81, № 4. С. 110–116. [Naumenko N.V., Naroko I.Yu., Popova N.V., Kalinina I.V., Satbaev B.K. The use of non-dimensional methods of disinfection of plant materials in the production of food products. *Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies*, 2019, vol. 81, no. 4, pp. 110–116. (In Russ.)]
3. Патент РФ № 2794769 опублик.: 24.04.2023 Бюл. № 12 Способ обеззараживания зерновых культур и других продуктов растительного происхождения / И.Ю. Потороко, И.В. Калинина, Н.В. Науменко, А.Я. Лейви; заявка: 2022128581, 03.11.2022. [Potoroko I.Yu., Kalinina I.V., Naumenko N.V., Leivi A.Ya. *Patent of the Russian Federation No. 2794769 publ.: 04.24.2023 Bul. No. 12 Method of disinfecting grain crops and other products of plant origin*. Application: 2022128581, 11/03/2022]
4. Bermudez-Aguirre D. *Advances in cold plasma applications for food safety and preservation*. Academic Press, 2019.
5. Claro T. et al. Cold-air atmospheric pressure plasma against clostridium difficile spores: A potential alternative for the decontamination of hospital inanimate surfaces. *Infection Control and Hospital Epidemiology*, 36(6), (2015), 742–744.
6. Devi Y. et al. Influence of cold plasma on fungal growth and aflatoxins production on groundnuts. *Food Control*, 77, (2017), 187–191.
7. Foster J.E., Mujovic S., Groele J., & Blankson I.M. Towards high throughput plasma based water purifiers: design considerations and the pathway towards practical application. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 51(29), (2018), aac816. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aac816>
8. Hertwig C. et al. Inactivation of salmonella enteritidis PT30 on the surface of unpeeled almonds by cold plasma. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 44, (2017), 242–248. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.02.007>
9. Laroussi M. Nonthermal decontamination of biological media by atmospheric pressure plasmas: Review, analysis, and prospects. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 30(4 D), (2002), 1409–1415.
10. Lee K.H. et al. Evaluation of cold plasma treatments for improved microbial and physico-chemical qualities of brown rice. *LWT – Food Science and Technology*, 73, (2016), 442–447. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.06.055>

11. Mahendran R., Ramanan K.R., Sargunam R., & Sarumathi R. Effect of cold plasma on mortality of tribolium castaneum on maida flour. *Agricultural Engineering*, 3(2016), 37–44.
12. Misra N.N. et al. (2015). Atmospheric pressure cold plasma (ACP) treatment of wheat flour. *Food Hydrocolloids*, 44, 115–121. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.08.019>
13. Moisan M., et al. Plasma sterilization. Methods and mechanisms. *Pure and Applied Chemistry*, 74(3), (2002), 349–358.
14. Niemira B.A., & Sites J. Cold plasma inactivates salmonella stanley and Escherichia Coli O157:H7 inoculated on golden delicious apples. *Journal of Food Protection*, 71(7), (2008), 1357–1365.
15. Perni S., Liu D.W., Shama G., & Kong M.G. Cold atmospheric plasma decontamination of the pericarps of fruit. *Journal of Food Protection*, 71(2), (2008), 302–308.
16. Prasad P., Mehta D., Bansal V., & Sangwan R.S. Effect of atmospheric cold plasma (ACP) with its extended storage on the inactivation of Escherichia coli inoculated on tomato. *Food Research International*, 102(May), (2017), 402–408. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.09.030>
17. Ramazzina I., et al. Effect of cold plasma treatment on the functional properties of fresh-cut apples. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(42), (2016), 8010–8018.
18. Selcuk M., Oksuz L., & Basaran P. Decontamination of grains and legumes infected with Aspergillus Spp. and Penicillium Spp. by cold plasma treatment. *Bioresource Technology*, 99(11), (2008), 5104–5109.
19. Shi H.U., et al. Reduction of aflatoxin in corn by high voltage atmospheric cold plasma. *Food and Bioprocess Technology*, 10(6), (2017), 1042–1052.
20. Stoffels E., Sakiyama Y., & Graves D.B. Cold atmospheric plasma: Charged species and their interactions with cells and tissues. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 36(4 PART 2), (2008), 1441–1457.
21. Thirumdas Rohit et al. (2016). 37 Innovative Food Science and Emerging Technologies. *Influence of Low Pressure Cold Plasma on Cooking and Textural Properties of Brown Rice*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.08.009>.
22. Thirumdas Rohit, Trimukhe A., Deshmukh R.R., and Annapure U.S. (2017). 157 Carbohydrate Polymers. *Functional and Rheological Properties of Cold Plasma Treated Rice Starch*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.11.050>.
23. Ukuku Dike O., Brendan A. Niemira, and Joseph Ukanalis. (2019). Nisin-based antimicrobial combination with cold plasma treatment inactivate listeria monocytogenes on granny smith apples. *Lwt* 104(December 2018): 120–27. [10.1016/j.lwt.2018.12.049](https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.12.049).

Информация об авторах

Науменко Наталья Владимировна, доктор технических наук, профессор кафедры «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, naumenkonv@susu.ru

Шемек Маруан, научный сотрудник кафедры «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, shemekm@susu.ru

Фаткуллин Ринат Ильгидарович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, fatkullinri@susu.ru

Information about the authors

Natalia V. Naumenko, Doctor of Sciences (Engineering), Professor of the Department of Food Technology and Biotechnology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, Naumenko_natalya@mail.ru

Maruan Shemek, Researcher, Department of Food and Biotechnology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, shemekm@susu.ru

Rinat I. Fatkullin, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Food and Biotechnology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, fatkullinri@susu.ru

Статья поступила в редакцию 05.04.2023

The article was submitted 05.04.2023