

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ ДЛЯ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ОТКРЫТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

(✉) Делягин В.Н.¹, Леонов С.В.¹, Некрасов М.Ю.¹, Кондратьев А.А.^{1,2}, Карзанов А.Н.¹

¹Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук
Новосибирская область, р.п. Краснообск, Россия

²Новосибирский государственный аграрный университет
Новосибирск, Россия

(✉) e-mail: valdel23@yandex.ru

Приведены результаты исследований по инактивации микроорганизмов на открытых поверхностях птицеводческих помещений с использованием низкотемпературной неравновесной плазмы. В качестве ее источника использован электроискровой разряд переменного тока при атмосферном давлении. Типы разряда – стримерный, факельный. Рассмотрено одновременное воздействие электромагнитных полей, заряженных частиц и химически активных соединений, образующихся при электроискровом разряде, на эффективность инактивации патогенной микрофлоры для различных поверхностей (акриловый грунт, эпоксидная смола, лак яхтный, бетонно-графитовая смесь). Обрабатываемый материал (биологический макет подстилочной поверхности пола в птичнике с нанесенным защитным слоем) установлен после электроискровой разрядной камеры, продуваемой плазмообразующим газом (атмосферный воздух). Основными поражающими факторами являются активные химические соединения: озон; свободные радикалы (ОН, О, О₂), ультрафиолетовое излучение в диапазоне 750–1600 ТГц, электромагнитное излучение от 50 Гц до 980 МГц, заряженные частицы и колебательно возбужденные молекулы азота и кислорода. Получены характеристики плотности потока электромагнитного излучения при электроискровом разряде. По результатам исследований максимальный эффект обработки открытых поверхностей низкотемпературной неравновесной плазмой достигается при использовании в качестве защитного материала поверхностей эпоксидной смолы. Количество инактивированных микроорганизмов при экспозиции 10–20 с достигает 100%. При инактивации микроорганизмов, находящихся на открытых поверхностях, длительность экспозиции экономически нецелесообразно принимать более 20 с. В исследованиях не выявлено существенного различия при использовании стримерного или факельного разрядов для обработки открытых поверхностей помещений.

Ключевые слова: низкотемпературная неравновесная плазма, электроискровой разряд, микроорганизмы, инактивация, патогенная микрофлора

THE USE OF LOW-TEMPERATURE PLASMA FOR DISINFECTION OF OPEN SURFACES OF INDUSTRIAL PREMISES

(✉) Delyagin V.N.¹, Leonov S.V.¹, Nekrasov M.Yu.¹, Kondratiev A.A.^{1,2}, Karzanov A.N.¹

¹Siberian Federal Scientific Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences
Krasnoobsk, Novosibirsk region, Russia

²Novosibirsk State Agrarian University
Novosibirsk, Russia

(✉) e-mail: valdel23@yandex.ru

The results of research on inactivation of microorganisms on open surfaces of poultry houses using low-temperature non-equilibrium plasma are presented. AC electrospark discharge at atmospheric pressure was used as its source. Discharge types are streamer, flare. The simultaneous effect of electromagnetic fields, charged particles and chemically active compounds formed by electrospark discharge on the efficiency of pathogenic microflora inactivation for various surfaces (acrylic primer, epoxy resin, yacht varnish, concrete-graphite mixture) is considered. The material to be treated (a biological model of the bedding surface of the floor in the poultry house with the applied protective layer) is installed after the electrospark discharge chamber blown with plasma-

forming gas (atmospheric air). The main affecting factors are active chemical compounds: ozone; free radicals (OH, O, O₂), ultraviolet radiation in the range of 750–1600 THz, electromagnetic radiation from 50 Hz to 980 MHz, charged particles and vibrationally excited nitrogen and oxygen molecules. Characterizations of electromagnetic radiation flux density at electrospark discharge are obtained. According to the research results, the maximum effect of treatment of exposed surfaces with low-temperature non-equilibrium plasma is achieved when epoxy resin is used as a surface protection material. The number of inactivated microorganisms at exposure of 10–20 s reaches 100%. When inactivating microorganisms on exposed surfaces, it is not economically feasible to take exposure time longer than 20 s. The studies found no significant difference when using streamer or flare discharges to treat outdoor facility surfaces.

Keywords: low-temperature nonequilibrium plasma, electrospark discharge, microorganisms, inactivation, pathogenic microflora

Для цитирования: Делягин В.Н., Леонов С.В., Некрасов М.Ю., Кондратьев А.А., Карзанов А.Н. Использование низкотемпературной плазмы для обеззараживания открытых поверхностей производственных помещений // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2023. Т. 53. № 11. С. 121–129. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2023-11-12>

For citation: Delyagin V.N., Leonov S.V., Nekrasov M.Yu., Kondratiev A.A., Karzanov A.N. The use of low-temperature plasma for disinfection of open surfaces of industrial premises. *Sibirskii vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki = Siberian Herald of Agricultural Science*, 2023, vol. 53, no. 11, pp. 121–129. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2023-11-12>

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Переход сельскохозяйственного производства на промышленную основу связан в первую очередь с увеличением плотности постановки животных и птицы в производственных помещениях. Данное обстоятельство требует создания высокоэффективных технических систем для обеззараживания материалов и сред, используемых в технологических процессах производства продукции.

Применяемые в настоящее время электрофизические методы инактивации патогенной микрофлоры (прямые и косвенные), как правило, используют электромагнитное излучение (ЭМИ) в определенном диапазоне частот различной интенсивности [1–3]. Достаточно полные результаты исследований электрофизических методов при инактивации микроорганизмов представлены в работах [4–9]. Геометрические размеры микроорганизмов и их электрофизические характеристики, определяющие степень летальности при их обработке в электромагнитных полях, имеют достаточно большие диапазоны варьирования. Представляется целесообразным использование ЭМИ во всем диапазоне шкалы – от радиочастот до жесткого ультрафиолетового излучения (UVC) [10].

Одним из возможных способов реализации подобного подхода является использование низкотемпературной неравновесной плазмы (ННП), генерируемой при электроискровом разряде [6–8]. Для оценки эффективности использования ННП необходимо определить спектр и плотность потока излучения, генерируемого при электроискровом разряде во всем диапазоне шкалы электромагнитных волн, с оценкой степени инактивации микроорганизмов, находящихся в воздухе и на открытой поверхности (пол, стены) [11, 12].

Цель исследования – определить эффективность использования низкотемпературной плазмы в процессе инактивации патогенных микроорганизмов при различных защитных поверхностях помещений.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объект исследования – система инактивации патогенных микроорганизмов в птицеводческом помещении. Исследуемые микроорганизмы – *Bacillus subtilis*, *Staphylococcus aureus*, *Staphylococcus albus*, *E. coli* и др. Микроорганизмы наносили на сегмент стандартной керамической плитки размером 48 × 48 мм. В качестве подложки на плитку

нанесен различный защитный поверхностный слой. Варианты защитного слоя – акриловый грунт, эпоксидная смола, лак яхтный, бетонно-графитовая смесь.

Учет общего микробного числа (ОМЧ) осуществлен по МУК 4.2.734–99 «Микробиологический мониторинг производственной среды».

В качестве источника ННП использован плазмотрон (см. рис. 1). Параметры установки приведены в табл. 1.

Измеряемые параметры:

- спектр и плотность потока электромагнитного излучения в диапазоне от 3000 м до 100 нм;
- время обработки исследуемого материала;
- количество положительных и отрицательных аэроионов;
- концентрация озона, процент инактивации микроорганизмов.

Контролируемые параметры:

- температура воздуха;
 - влажность воздуха;
 - температура плазмообразующего газа.
- Используемые измерительные приборы:
- счетчик аэроионов MAC-01;
 - многофункциональный прибор testo 435-2;
 - газоанализатор универсальный ГАНК-4;
 - многоканальный спектрометр «Колибри»;
 - радиометр UV-диапазона (а, б и с поддиапазонов) ТКА-ПКМ;
 - измеритель плотности ИК-излучения «МК-метр»;
 - регистрация температуры – инфракрасный термометр с переключаемой оптикой Testo 845, пирометр Кельвин Компакт 1200/175.

Табл. 1. Параметры электроискровой установки для генерации плазмы

Table 1. Parameters of the electrospark unit for plasma generation

Параметр	Значение
Напряжение высоковольтного источника, кВ	12
Скорость воздушного потока в разрядной камере, м/с	1–4
Площадь сечения разрядной камеры, мм ²	80–110
Максимальная потребляемая мощность установки, Вт	1500–3000
Расчетная напряженность электрического поля в разрядном промежутке, В/м	450 000
Частота переменного тока, кГц	20

Методика проведения эксперимента

Обрабатываемый материал (биологический макет подстилочной поверхности пола в птичнике с нанесенным защитным слоем) установлен после электроискровой разрядной камеры, продуваемой плазмообразующим газом (атмосферный воздух). Основными поражающими факторами являются активные химические соединения: озон, свободные радикалы (OH, O, O₂), ультрафиолетовое излучение в диапазоне 750–1600 ТГц, электромагнитное излучение от 50 Гц до 980 МГц, заряженные частицы и колебательно возбужденные молекулы азота и кислорода.

Экспозицию воздействия ННП при разряде в газе изменяли от 5 до 300 с. При удалении непрозрачного экрана с поверхности кварцевой трубы дополнительно оценивали эффективность воздействия электромагнитного излучения в радио- и ультрафиолетовом диапазонах.

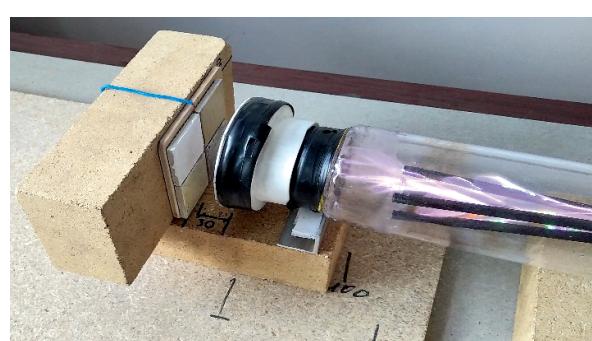
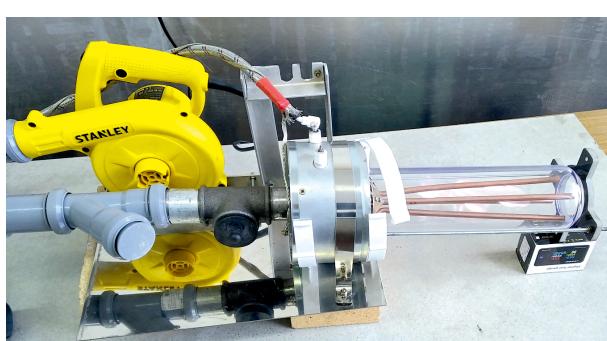


Рис. 1. Установка для генерации низкотемпературной плазмы (составлена авторами)

Fig. 1. Installation for low-temperature plasma generation (compiled by the authors)

Оценку проводили по снижению бактериальной обсемененности подстилочного материала в опытном образце по сравнению с контрольным. Для этого из объединенной пробы каждого экспериментального воздействия отмеряли навеску 5 г и вносили в 50 мл стерильного физраствора (разведение 1 : 10). Колбу со взвесью при комнатной температуре 8 °C помещали на шейкер при частоте 100 колебаний/мин и выдерживали 30 мин. Затем взвесь центрифугировали при 3000 об./мин для отделения крупных частиц. Далее из полученного супернатанта готовили последовательные разведения на приборе спирального посева EasySpiral. Каждым разведением засевали по три чашки Петри с мясопептонным агаром по 100 мкл. После 20 ч инкубации при 37 °C проводили подсчет выросших колоний на чашках прибором Scan 500. В качестве окончательного результата принимали среднее арифметическое чашек. Определяли микробную обсемененность исследуемой подложки. Оценку наличия роста отдельных видов микроорганизмов проводили на селективных питательных средах.

Оценку уровней напряженности электрического и магнитного полей генерируемой низкотемпературной плазмы, а также мощности потока излучения проводили на расстоянии 20 см от поверхности стеклянной трубы плазмотрона. Замеры осуществляли с помощью прибора АТЭ-8507 на фиксированных частотах. Расстояние между датчиками плотности потока электромагнитного излучения и электроискровой камерой составило 0,4 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Параметры электромагнитного излучения плазмы (ЭМИ), генерируемой при электроискровом разряде, представлены в табл. 2.

Плотность потока ЭМИ в диапазоне 190–400 нм представлена в табл. 3.

Концентрация озона в потоке воздуха составила 7–8 мг/м³.

Расчет напряженности электрического поля в межэлектродном пространстве осуществляли с использованием программы ELCUT. Максимальная напряженность электрического поля составила 400 000–500 000 В/м. Общий вид распределения эквипотенциальных электрических полей в газоразрядной камере представлен на рис. 2.

Табл. 2. Значения напряженности электрического поля и плотности потока ЭМИ по диапазонам частот

Table 2. Values of electric field strength and electromagnetic radiation flux density by frequency ranges

Частота ЭМИ	Напряженность электрического поля, В/м	Плотность потока, Вт/м ²
100 кГц	270	148
200 кГц	149	62
500 кГц	128	45
1 МГц	174	84
10 МГц	192	98
13,56 МГц	158	67
100 МГц	138	60
900 МГц	0,93	0
1,8 ГГц	0,7	0
2,4 ГГц	0,5	0

Табл. 3. Плотность потока электромагнитного излучения в ультрафиолетовом спектре

Table 3. Electromagnetic radiation flux density in the UV spectrum

UV-диапазон	Значение плотности потока ЭМИ, мВт/м ²
UVA	48
UVB	50
UVC	130

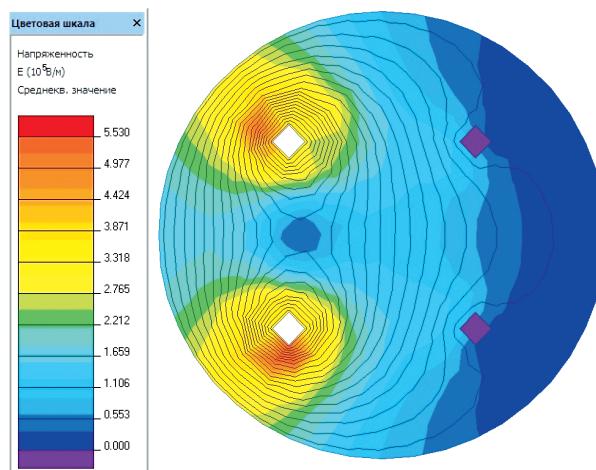


Рис. 2. Распределение напряженности электрического поля в приэлектродном пространстве плазмотрона

Fig. 2. Distribution of electric field strength in the near-electrode space of the plasmatron

Для исследования динамических характеристик электроискрового разряда произведены осциллографирование и высокоскоростная видеосъемка разрядного тока и напряжения на электродах в режиме электроискрового и стримерного разрядов (см. рис. 3, 4). Спектр излучения ННП в диапазоне 600–1500 ТГц представлен на рис. 5.

Результаты инактивации микроорганизмов электромагнитным излучением и химически активными соединениями ННП для различных защитных поверхностей представлены в табл. 4, результаты исследования эффективности инактивации микроорганизмов для стримерного и факельного разрядов – в табл. 5.

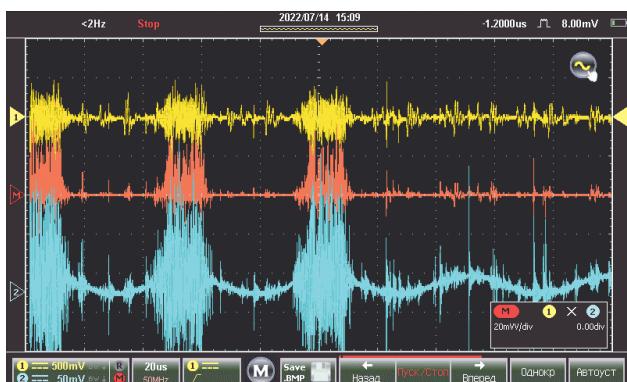


Рис. 3. Осциллограмма факельного разряда (ток, напряжение)

Fig. 3. Oscillogram of the electrospark discharge (current, voltage)

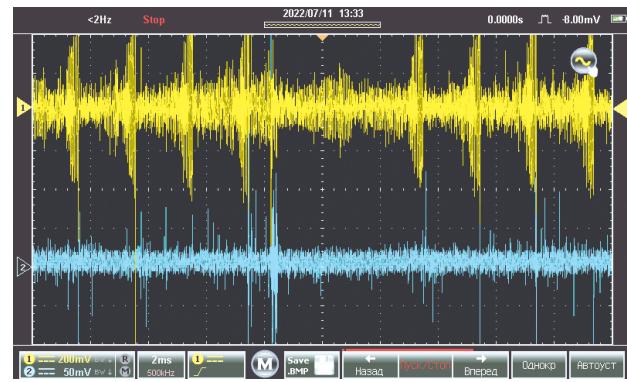


Рис. 4. Осциллограмма стримерного разряда (ток, напряжение)

Fig. 4. Oscillogram of the streamer discharge (current, voltage)

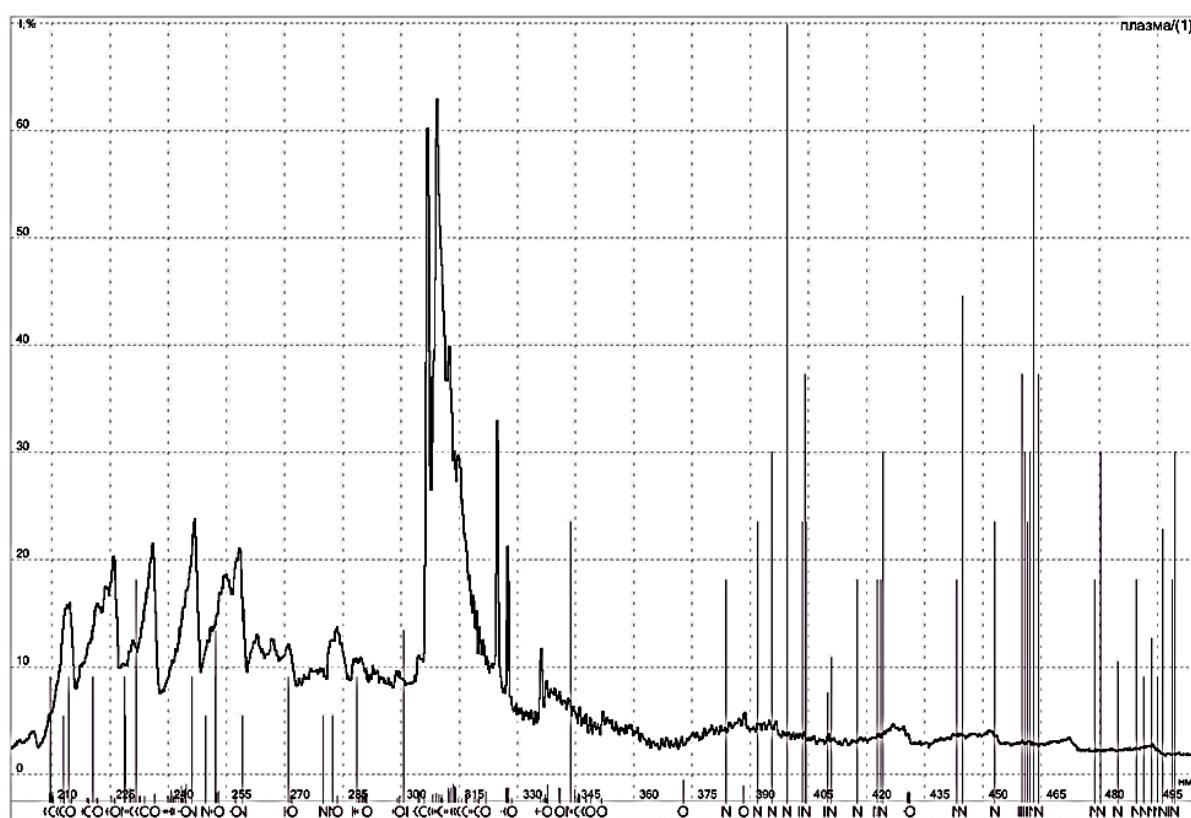


Рис. 5. Спектр излучения ННП в диапазоне 600–1500 ТГц

Fig. 5. Emission spectrum of the LNP in the range of 600–1500 THz

Табл. 4. Оценка инактивации микроорганизмов ННП на различных защитных поверхностях
Table 4. Evaluation of inactivation of LNP microorganisms on various protective surfaces

Номер образца, материал подложки (грунтовочного слоя)	Время экспозиции, с	Количество бактерий, КОЕ/мл		Кратность инактивации бактерий, отн. ед.	Инактивация бактерий, %
		до обработки	после обработки		
Контроль (плитка без покрытия)	Без обработки	1,30E + 06	1,30E + 06	1,00	0,00E + 00
Плитка без покрытия	5	1,30E + 06	2,00E + 05	6,50	85
	10		2,00E + 05	6,50	85
Эпоксидный слой	5	1,30E + 06	3,00E + 05	4,33	77
	10		0,00E + 00	∞	100
Акриловый слой	5	1,30E + 06	2,00E + 05	6,50	85
	10		9,00E + 05	1,44	31
Плитка с вкраплениями металла	5	1,30E + 06	0,00E + 00	∞	100
	10		0,00E + 00	∞	100

Примечание. Расстояние до факела плазмы (L) составило 30 мм.

Табл. 5. Результаты инактивации микроорганизмов ННП для различных видов электроискрового разряда

Table 5. Results of inactivation of LNP microorganisms for various types of electric spark discharge

Характери- стика разряда	Материал подложки	Время экспозиции, с	Количество бактерий		Кратность инактивации бактерий отн. ед.	Инактивация бактерий %
			до обработки	после обработки		
			КОЕ/мл			
С	Без покрытия	5	8,60E + 05	4,30E + 05	2,00	50,00
		10		1,00E + 04	86,00	98,84
		20		3,00E + 04	28,67	96,51
		Φ		3,40E + 05	2,53	60,47
		10		6,00E + 04	14,33	93,02
		20		1,50E + 05	5,73	82,56
C	Лак яхтный	5	6,10E + 05	1,20E + 05	5,08	80,33
		10		1,00E + 04	61,00	98,36
		20		3,30E + 05	1,85	45,90
		Φ		0,00E + 00	∞	100,00
		10		3,60E + 05	1,69	40,98
		20		6,10E + 05	1,00	0,00
C	Эпоксидная смола	5	7,10E + 05	2,00E + 04	35,50	97,18
		10		0,00E + 00	∞	100,00
		20		0,00E + 00	∞	100,00
		Φ		1,00E + 04	71,00	98,59
		10		0,00E + 00	∞	100,00
		20		0,00E + 00	∞	100,00
C	Графит, сверху лак яхтный	5	6,60E + 05	1,00E + 05	6,60	84,85
		10		9,00E + 04	7,33	86,36
		20		3,00E + 05	2,20	54,55
		Φ		7,00E + 04	9,43	89,39
		10		1,00E + 04	66,00	98,48
		20		1,70E + 05	3,88	74,24

Примечание. С – стриммер, Φ – факел.

По результатам исследований максимальный эффект при обработке открытых поверхностей низкотемпературной неравновесной плазмой достигался при использовании в качестве защитного материала эпоксидной смолы. Оценка эффективности использования яхтного лака требует проведения дополнительных исследований.

Результаты, представленные в табл. 5, позволяют сделать вывод, что стримерный и факельный разряды по эффективности инактивации микроорганизмов на открытых поверхностях примерно равнозначны.

Количество инактивированных микроорганизмов при экспозиции 10–60 с и использовании в качестве защитного покрытия эпоксидной смолы достигало 100%.

При инактивации микроорганизмов, находящихся на открытых поверхностях, длительность экспозиции экономически нецелесообразно принимать более 20 с.

В спектре излучения плазмы зафиксированы свободные радикалы (гидроксильная группа и др.). Оценка влияния свободных радикалов на инактивацию микроорганизмов требует дополнительного изучения.

В дальнейшем необходимо оценить вклад каждого из поражающих факторов (электромагнитное излучение в радиодиапазоне, ультрафиолетовое излучение, заряженные частицы, озон) на степень инактивации для различных групп микроорганизмов.

Полученные результаты исследований и литературный обзор работ других авторов [5–9] по данной теме позволяют сделать вывод о наличии синергетического эффекта воздействия поражающих факторов низкотемпературной неравновесной плазмы на исследуемые микроорганизмы.

По сравнению с традиционным методом обработки поверхности для обеззараживания воздуха в помещении (озонирование) использование генератора низкотемпературной плазмы позволяет получить требуемые параметры инактивации и значительно сократить длительность экспозиции относительно простым способом – путем изменения геометрических размеров электроискровой камеры.

ВЫВОДЫ

1. Максимальный эффект обработки открытых поверхностей низкотемпературной неравновесной плазмой достигается при использовании в качестве защитного материала поверхностей эпоксидной смолы. Количество инактивированных микроорганизмов при экспозиции 10–20 с достигает 100%.

2. При инактивации микроорганизмов, находящихся на открытых поверхностях, длительность экспозиции экономически нецелесообразно принимать более 20 с.

3. Не выявлено существенного различия при использовании стримерного или факельного разрядов для обработки открытых поверхностей помещений. Затраты энергии при сопоставимом технологическом эффекте при стримерном разряде существенно ниже.

4. В дальнейших исследованиях по данной теме целесообразно провести испытание разработанного макета плазмотрона в производственных условиях при наличии реального видового состава микроорганизмов и оценить вклад каждого из поражающих факторов на степень инактивации для различных групп микроорганизмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акисеев Ю.С. Низкотемпературная плазма при атмосферном давлении и ее возможности для приложений // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2019. Т. 62. Вып. 8. С. 26–60.
2. Zhitong Chen, Richard E. Wirtz. Technology and applications of cold atmospheric plasma (CAP) // General lectures on mechanical engineering. 2021. Vol. 6 (2). P. i-191. DOI: 10.2200/S01107ED1V01Y202105MEC035.
3. Koichi Takaki, Katsuyuki Takahashi, Daisuke Hamanaka, Riichiro Yoshida, Toshitaka Uchino. Plasma and electrostatic function to preserve the quality of agricultural products at the post-harvest stage // Japanese Journal of Applied Physics. 2021. Vol. 60 (1). P. 010501. DOI: 10.3548/1347-4065/abcc13.
4. Gulyaev Yu.V., Taranov I.V., Cherepenin V.A. The use of powerful electromagnetic pulses for influencing bacteria and viruses // Reports of the

- Russian Academy of Sciences. 2020. Vol. 493. P. 15–17.
5. *Zakirova A.R.* Protection of electrical personnel from the harmful effects of electromagnetic fields: monograph. Yekaterinburg: Publishing house of USUPS, 2017. 188 p.
6. *Koichi Taki, Katsuyuki Takahashi, Nobuo Hayashi, Dong Wan, Takayuki Okima.* The use of pulsed energy in agriculture and the food industry // *Reviews of Modern Plasma Physics.* 2021. Vol. 5 (1). DOI: 10.1007/s41614-021-00059-9.
7. *Lin Zhang, Yongtao Guo, Jianfeng Te, Zheng-hui Yao, Zi hao Feng, Xiong Wu, Xinxin Wang, Haiyun Luo.* Recalculated DBD program for air disinfection: characteristics of dosage and dose-dependent action // *Journal of Hazardous Materials.* 2023. Vol. 447. P. 130780. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.130780.
8. *Kang Wang, Siyi Lu, Zhiwei Zhang.* Inactivation of airborne bacteria using various ultraviolet light sources: modeling efficiency, energy use, and endotoxin degradation // *General Environmental Science.* 2019. Vol. 655. P. 787–795. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.266.
9. *Hao Wang, Liyan Zhang, Haiyun Luo, Xinxin Wang, Jinfeng Te, Zhe Ren.* Sterilization processes and mechanisms for the treatment of *E. coli* with plasma with a dielectric barrier // *Applied and Environmental Microbiology.* 2019. Vol. 86 (1). DOI: 10.1128/AEM.01907.
10. *Angela Luengas, Astrid Barona, Cecile Hort, Gorka Gallastegui, Vincent Platel, Ana Elias.* Review of indoor air purification technologies. *Reviews in Environmental Science and Bio // Technology.* 2015. Vol. 14 (3). P. 499–522. DOI: 10.1007/s11157-015-9363-9.
11. *Lu Song, Jianfeng Zhou, Kang Wang, Ge Meng, Yunfei Li, Mourinho Yarin, Jian Wu, Xing Xie.* Airborne pathogenic microorganisms and the development of air purification technology: an overview // *Journal of Hazardous Materials.* 2022. Vol. 424. P. 27429. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.127429.
12. *Joseph P. Wood, Bolden Charles Adrian.* Overview of disinfection methods for the detection of *Bacillus anthracis* and other microorganisms associated with sterile preparations, methylamines and other armed material // *Environmental Science and Technology.* 2019. Vol. 53 (8). P. 4045–4062. DOI: 10.1021/acs.est.8b05274.
- REFERENCES**
1. Akishev Y.S. Non-thermal plasma at atmospheric pressure and its opportunities for applications. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya = Russian Journal Of Chemistry And Chemical Technology,* 2019, vol. 62, is. 8, pp. 26–60. (In Russian).
 2. Zhitong Chen, Richard E. Wirtz. Technology and applications of cold atmospheric plasma (CAP). *General lectures on mechanical engineering,* 2021, vol. 6 (2), p. i-191. DOI: 10.2200/S01107ED1V01Y202105MEC035.
 3. Koichi Takaki, Katsuyuki Takahashi, Daisuke Hamanaka, Riichiro Yoshida, Toshitaka Uchino. Plasma and electrostatic function to preserve the quality of agricultural products at the post-harvest stage. *Japanese Journal of Applied Physics,* 2021, vol. 60 (1), p. 010501. DOI: 10.35848/1347-4065/abcc13.
 4. Gulyaev Yu.V., Taranov I.V., Cherepenin V.A. The use of powerful electromagnetic pulses for influencing bacteria and viruses. *Reports of the Russian Academy of Sciences,* 2020, vol. 493, pp. 15–17.
 5. *Zakirova A.R. Protection of electrical personnel from the harmful effects of electromagnetic fields.* Yekaterinburg: Publishing house of USUPS, 2017. 188 p.
 6. *Koichi Taki, Katsuyuki Takahashi, Nobuo Hayashi, Dong Wan, Takayuki Okima.* The use of pulsed energy in agriculture and the food industry. *Reviews of Modern Plasma Physics,* 2021, vol. 5 (1). DOI: 10.1007/s41614-021-00059-9.
 7. *Lin Zhang, Yongtao Guo, Jianfeng Te, Zheng-hui Yao, Zi hao Feng, Xiong Wu, Xinxin Wang, Haiyun Luo.* Recalculated DBD program for air disinfection: characteristics of dosage and dose-dependent action. *Journal of Hazardous Materials,* 2023, vol. 447, p. 130780. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.130780.
 8. *Kang Wang, Siyi Lu, Zhiwei Zhang.* Inactivation of airborne bacteria using various ultraviolet light sources: modeling efficiency, energy use, and endotoxin degradation. *General Environmental Science,* 2019, vol. 655, pp. 787–795. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.266.
 9. *Hao Wang, Liyan Zhang, Haiyun Luo, Xinxin Wang, Jinfeng Te, Zhe Ren.* Sterilization processes and mechanisms for the treatment of *E. coli* with plasma with a dielectric barrier. *Applied and Environmental Microbiology,* 2019, vol. 86 (1). DOI: 10.1128/AEM.01907.

10. Angela Luengas, Astrid Barona, Cecile Hort, Gorka Gallastegui, Vincent Platel, Ana Elias. Review of indoor air purification technologies. *Reviews in Environmental Science and Bio. Technology*, 2015, vol. 14 (3), pp. 499–522. DOI: 10.1007/s11157-015-9363-9.
11. Lu Song, Jianfeng Zhou, Kang Wang, Ge Meng, Yunfei Li, Mourinho Yarin, Jian Wu, Xing Xie. Airborne pathogenic microorganisms and the development of air purification technology: an overview. *Journal of Hazardous Materi-*
- als, 2022, vol. 424, p. 27429. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.127429.
12. Joseph P. Wood, Bolden Charles Adrian. Overview of disinfection methods for the detection of *Bacillus anthracis* and other microorganisms associated with sterile preparations, methylamines and other armed material. *Environmental Science and Technology*, 2019, vol. 53 (8), pp. 4045–4062. DOI: 10.1021/acs.est.8b05274.

ИФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

(✉) **Делягин В.Н.**, доктор технических наук, главный научный сотрудник; **адрес для переписки:** Россия, 630501, Новосибирская область, р.п. Краснообск, а/я 463; e-mail: valdel23@yandex.ru

Леонов С.В., старший научный сотрудник
Некрасов М.Ю., инженер
Кондратьев А.А., инженер
Карзанов А.Н., инженер

AUTHOR INFORMATION

(✉) **Valery N. Delyagin**, Doctor of Science in Engineering, Head Researcher; **address:** PO Box 463, Krasnoobsk, Novosibirsk Region, 630501, Russia; e-mail: valdel23@yandex.ru

Sergey V. Leonov, Senior Researcher
Mikhail Yu. Nekrasov, Engineer
Arkady A. Kondratiev, Engineer
Alexei N. Karzanov, Engineer

Дата поступления статьи / Received by the editors 08.09.2023
Дата принятия к публикации / Accepted for publication 18.10.2023
Дата публикации / Published 15.12.2023