

УДК 537.523/527; 533.9.03
EDN: JXLASG

PACS: 52.77. –j

**Портативный источник объемной холодной плазменной струи
для биомедицинских применений**

© Б. Б. Балданов*, А. П. Семенов, Ц. В. Ранжуров

Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, 670047 Россия

*E-mail: baibat@mail.ru

Статья поступила в редакцию 05.03.2026; после доработки 03.08.2026; принята к публикации: 22.10.2026
Шифр научной специальности: 1.3.5.

Разработан портативный плазменный стерилизатор с нагнетанием плазмообразующего газа (аргон) через завихритель, который создает в разрядном промежутке винтовой вихревой поток газа. При расходе газа $> 5 \times 10^{-5}$ кг/с поток газа закручивается и стримерный разряд заполняет всю площадь сечения анода на выходе из сопла. Генерируемая в разрядном промежутке нетермическая плазма выносится потоком аргона, формируя холодную плазменную струю. Показано бактерицидное действие нетермической плазмы на вегетативную форму штаммов *Escherichia coli*.

Ключевые слова: стримерный разряд, нетермическая аргоновая плазма, завихритель газа, плазменная струя, плазменная инактивация микроорганизмов.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-5-89-95

Введение

В настоящее время применение низкотемпературной неравновесной плазмы в медицине является одним из наиболее перспективных подходов, обеспечивающих активацию иммунного ответа и процессов заживления, уменьшение микробного обсеменения инфицированных ран и язв без инициации новых полирезистентных штаммов [1–16]. Активно изучается биофизическое воздействие нетермической плазмы на онкологические образования [17, 18]. Начиная с работ [19–22] по применению низкотемпературной плазмы для подавления жизнеспособности раковых клеток получены многообещающие результаты в фундаментальных исследованиях и клинических испытаниях [23, 24].

Среди многочисленных разновидностей низкотемпературной плазмы атмосферного давления в биомедицинских приложениях используются тлеющие высокочастотные разряды, диэлектрические барьерные разряды, и

большой интерес привлекают так называемые холодные плазменные струи. Широкое распространение получили источники плазменных струй атмосферного давления, где в роли рабочего газа выступают гелий, аргон и/или их смеси с азотом. Необходимо отметить, что значительно труднее сформировать плазменные струи атмосферного давления в воздухе. В этом случае образуется высокая концентрация химически активных частиц, плазменный поток становится чувствительным к скорости прокачки газа, и возрастает его температура. Важно и то, что сформировать протяженную плазменную струю не удастся [25]. Свечение формируется лишь в приэлектродной зоне и быстро затухает в свободном пространстве вне её.

Особое место среди источников неравновесной плазмы атмосферного давления занимают СВЧ-разряды как электродного, так и безэлектродного типа. В [26–28] разработаны источники СВЧ-плазмы атмосферного давления, в которых использовалась схема плаз-

менной горелки медицинского аппарата MicroPlaster β [29, 30], применяемого для лечения обширных инфицированных ран и язв. Для создания плазменного потока предложено использовать многоэлектродный СВЧ-генератор, в котором в качестве плазмообразующего газа используется аргон.

В то же время ведутся интенсивные разработки по созданию компактных источников нетермической плазмы, что открывает большие перспективы для медицинского применения [31–33]. Стремление к миниатюризации обусловлено необходимостью интеграции плазменных технологий в клиническую практику: компактные устройства проще использовать непосредственно у постели больного, в небольших кабинетах, а также в полевых условиях.

В статье предложен принципиально новый подход к формированию нетермической аргоновой струи атмосферного давления на основе стримерного разряда атмосферного давления, формируемого в вихревом потоке газа.

Техника и методика эксперимента

На рис. 1 представлена структурная схема портативного источника нетермической плазменной струи (портативного плазменного стерилизатора).

Источник плазменной струи представляет собой диэлектрический коаксиальный канал 1 длиной 14 см с внутренним диаметром 1 см, в который соосно вставлены металлический острый электрод 3 диаметром 0,01 см и радиусом закругления острия 25 мкм и цилиндрический анод 2 длиной 4 см и внутренним диаметром 1 см, которые, в свою очередь,

фиксируются полимерной втулкой 4 диаметром 1 см и длиной 1,6 см. Втулка 4 снабжена на внешней цилиндрической поверхности канавками 5 сечением 0,2 мм², разнесенные по внешней окружности торцевого среза втулки 4 под углом 120°. Рабочий газ (аргон) поступает по винтовой линии через три канавки в анодную полость, где создается винтовой вихревой поток 6 рабочего газа в полости анодного цилиндра. Расстояние между двумя соседними канавками, измеренное вдоль оси устройства, составляет 0,025 см. Расход аргона G измеряется с помощью ротаметра РМ-А-0,16 ГУЗ до 5×10^{-5} кг/с. Разрядная зона формируется у торца диэлектрического канала (рис. 1) между внутренним высоковольтным острым электродом и заземленным цилиндрическим электродом. Для генерации плазменной струи использовался источник постоянного напряжения до 20 кВ. Для стабилизации разряда острый электрод нагружался регулируемым балластным сопротивлением $R_6 > 1$ МОм.

Бактерицидные свойства струи плазмы, генерируемой портативным плазменным стерилизатором, исследовались по воздействию на вегетативную форму штаммов *Escherichia coli* (кишечная палочка). Для оценки чувствительности микроорганизмов к нетермической струе плазмы использовали методику, основанную на измерении диаметров зон поражения засеянного тест-микроорганизмами газона. В чашке Петри засеивали газон, для этого вносили 10^{-4} л рабочей суспензии с агаризованной средой и тщательно растирали шпателем. Засеянный газон подвергали воздействию нетермической плазменной струи и инкубировали в термостате в течение суток при температуре 310 К, после чего измеряли диаметр образовавшихся зон поражения.

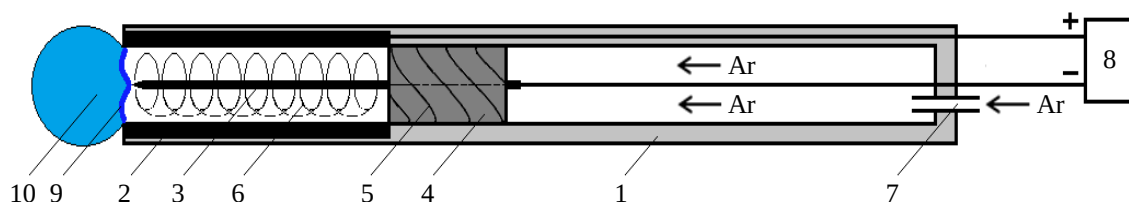


Рис. 1. Функциональная схема портативного плазменного стерилизатора: 1 – диэлектрическая трубка, 2 – анод, 3 – острый стержневой катод, 4 – завихритель, 5 – винтовые канавки, 6 – вихревой поток газа, 7 – отверстие, 8 – высоковольтный источник питания, 9 – стримерный разряд, 10 – струя плазмы

Результаты и обсуждение

При подаче рабочего газа аргона $G > 1$ л/мин и приложении к электродам высокого постоянного напряжения $U \sim 5\text{--}6$ кВ зажигается разряд (рис. 2а). Разряд представляет собой тонкие токовые нити (стримеры), распространяющиеся между острым стержневым электродом и цилиндрическим анодом.

На пространственное распределение стримеров в разрядном промежутке существенное влияние оказывает вихревой режим течения газа. При небольших расходах газа G (режим 1, $G \leq 5 \times 10^{-5}$ кг/с) закручивание потока рабочего газа незначительно. Как видно из рис. 2а, распределение токовых нитей в пределах сопла в данном режиме имеет неоднородный характер. На выходе из сопла наблюдаются три небольших токовых канала, расширяющиеся в прианодной области. Наблюдаемая структура токовых каналов, предположительно, связана с формированием на срезе сопла локальных зон с различной плотностью и скоростью движения газа. Такие гидродинамические неоднородности могут приводить к изменению пространственного распределения заряженных частиц и, как следствие, к локальному изменению электри-

ческого поля. Вероятно, это способствует формированию нескольких отдельных токовых каналов, которые при дальнейшем развитии разряда могут расширяться в прианодной области.

Для оценки эффективности источника плазмы проведены модельные эксперименты по определению выживаемости микроорганизмов при воздействии нетермической аргонной плазмы на предварительно засеянных сплошным газом чашках Петри. Поверхность агара, засеянного культурой *E.coli*, спустя 24 ч после обработки плазмой представлена на рис. 2б.

Результаты эксперимента показали, что воздействие плазменных струй в режиме 1 подавляет рост бактерий на отдельных участках поверхности плотной питательной среды. Как видно, в результате обработки в течение 10 сек на поверхности плотной питательной среды образуются зоны отсутствия роста бактерий (зоны ингибирования) с размерами 1–1,5 см, то есть наблюдается гибель практически всех клеток в зоне воздействия плазмы. На размер и форму зон ингибирования роста бактерий на поверхности чашки существенное влияние оказывает характер развития разряда (рис. 1а).

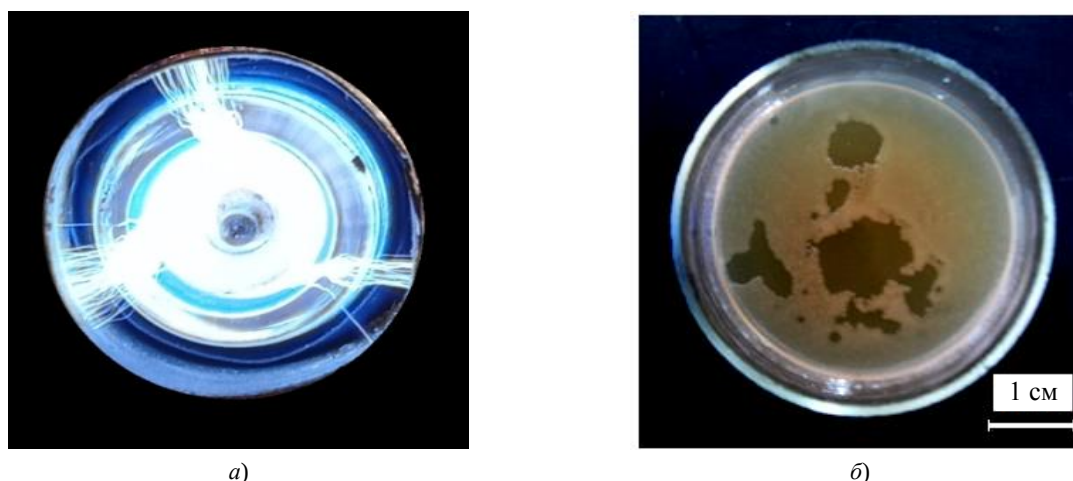


Рис. 2. а) Стримерный разряд (режим 1); б) Зоны инактивации бактериального роста кишечной палочки *Escherichia Coli*, расход аргона $G < 5 \times 10^{-5}$ кг/с, расстояние от сопла до поверхности агара $d = 0,5$ см

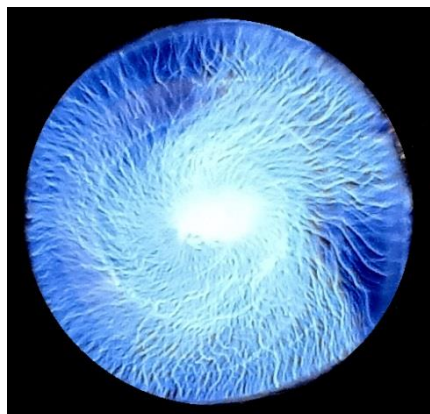
Выраженный антимикробный эффект плазменного облучения проявляется при увеличении расхода газа G (режим 2). В режиме 2 увеличение расхода газа ($G > 5 \times 10^{-5}$ кг/с) при-

водит к закручиванию потока газа, сопровождающемуся заполнением стримерами полости анодного электрода (рис. 3а). Данный подход позволяет сгенерировать объёмную нетерми-

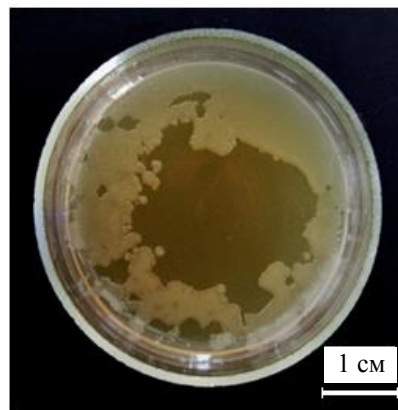
ческую плазменную струю; диаметр сформированной плазменной струи составляет 1 см, длина струи – 1–1,5 см.

Как видно из рис. 3б, диаметр зоны ингибирования роста бактерий после 10 сек об-

работки превышает диаметр сопла генератора плазмы. Температура на поверхности питательной среды во время плазменной обработки была в пределах оптимальной температуры роста микроорганизмов (32 °C).



а)



б)

Рис. 3. а) Стримерный разряд (режим 2); б) Зоны инактивации бактериального роста кишечной палочки *Escherichia Coli*, расход аргона $G > 5 \times 10^{-5}$ кг/с, расстояние от сопла источника до поверхности агара $d = 0,5$ см

Заключение

Разработан портативный источник нетермической аргоновой плазмы, формирующий в вихревом потоке газа холодную плазменную струю атмосферного давления. Установлена зависимость биоцидного эффекта плазменной обработки от закрутки рабочего газа. При небольших расходах газа ($G \leq 5 \times 10^{-5}$ кг/с) формируется трехканальная структура разряда со стримерами, при этом антимикробный эффект выражен слабо. Значительно более выраженный эффект наблюдается при увеличении расхода газа ($G > 5 \times 10^{-5}$ кг/с) и закрутке потока: формируется объемная нетермическая плазменная струя, при этом площадь зоны ингибирования после 10 с обработки значительно превышает площадь выходного сечения сопла. Это указывает на существенную роль не только наличия плазмы, но и ее пространственного распределения и объемного характера в достижении выраженного антимикробного действия.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Министерства образования и науки Республики Бурятия на реализацию проектов прикладных научных исследований,

Соглашение № 30-2025-008409 и в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, научная тема FWSF-2024-0010.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. VanGils C., Hofmann S., Boekema B. K. H. L., Brandenburg R., Bruggeman P. J. / J. Phys. D Appl. Phys. 2013. Vol. 46. P. 175203.
2. Oh J.-S., Szili E. J., Gaur N., Hong S.-H., Furuta H., Kurita H., Mizuno A., Hatta A., Short R. D. / J. Phys. D Appl. Phys. 2016. Vol. 49. P. 304005.
3. Liu Z., Zhou C., Liu D., He T., Guo L., Xu D., Kong M. / AIP Adv. 2019. Vol. 9. P. 015014.
4. Milhan N. V. M., Chiappim W., Sampaio A. D. G., da Cruz Vegian M. R., Pessoa R. S., Koga-Ito C. Y. / Int. J. Mol. Sci. 2022. Vol. 23. P. 4131.
5. Schweigert I., Zakrevsky D., Milakhina E., Gugin P., Biryukov M., Polyakova A., Kryachkova N., Gorbunova E., Epanchintseva A., Pyshnaya I., Koval O. / Plasma Physics Reports. 2024. Vol. 50. P. 1375–1387.
6. Gherardi M., Tonini R., Colombo V. / Trends Biotechnol. 2017. Vol. 36. P. 583–585.
7. Lata S., Chakravorty S., Mitra T., Pradhan P. K., Mohanty S., Patel P., Jha E., Panda P. K., Verma S. K., Suar M. / Mater. Today Bio. 2022. Vol. 13. P. 100200.
8. Thirumdas R., Kothakota A., Annapure U., Sili-veru K., Blundell R., Gatt R., Valdramidis V. P. / Trends Food Sci. Technol. 2018. Vol. 77. P. 21–31.
9. Subramanian P. G., Rao H., Shivapuji A. M., Girard-Lauriault P. L., Rao L. / J. Appl. Phys. 2021. Vol. 129. P. 093303.

10. Zhou R., Zhou R., Wang P., Xian Y., Mai-Prochnow A., Lu X. P., Cullen P. J., Ostrikov K., Bazaka K. / J. Phys. D Appl. Phys. 2020. Vol. 53. P. 303001.
11. Pan J., Li Y. L., Liu C. M., Tian Y., Yu S., Wang K. L., Zhang J., Fang J. / Plasma Chem. Plasma Process. 2017. Vol. 37. P. 1091–1103.
12. Guo J.-J., Li M.-D., Sun Q.-Q., Yang W., Zhou P., Ding S.-J., Zhang D. W. / Chem. Vap. Depos. 2013. Vol. 19. P. 156–160.
13. DeMelo T. F., Rocha L. C., Silva R. P., Pessoa R. S., Negreiros A. M. P., Sales Júnior R., Tavares M. B., Alves Junior C. / Materials. 2022. Vol. 15. P. 4854.
14. Chiappim W., Sampaio A., Miranda F., Fraga M., Petraconi G., Sobrinho A. D. S., Kostov K., Koga-Ito C., Pessoa R. / Water. 2021. Vol. 13. P. 1480.
15. Chiappim W., Sampaio A., Miranda F., Petraconi G., Sobrinho A. S., Cardoso P., Kostov K., Koga-Ito C., Pessoa R. / Plasma Process. Polym. 2021. Vol. 18. P. 2100010.
16. Sampaio A. D. G., Chiappim W., Milhan N. V. M., Neto B. B., Pessoa R., Koga-Ito C. Y. / Int. J. Mol. Sci. 2022. Vol. 23. P. 13893.
17. Živani M., Espona-Noguera A., Lin A., Canal C. / Adv. Sci. 2023. Vol. 10 (8). P. 2205803.
18. Keidar M., Shashurin A., Volotskova O., Stepp M., Srinivasan P., Sandler A., Trink B. / Phys. Plasmas 2013. Vol. 20 (5). P. 057101.
19. Fridman G., Fridman G., Gutsol A., Shekhter A., Vasilets V., Fridman A. / Plasma Process. Polym. 2008. Vol. 5. P. 503–533.
20. Huang J., Li H., Chen W., Lv G., Wang X., Zhang G., Ostrikov K., Wang P., Yang S. / Appl. Phys. Lett. 2011. Vol. 99. P. 253701.
21. Keidar M., Walk R., Shashurin A., Srinivasan P., Sandler A., Dasgupta S., Ravi R., Guerrero-Preston R., Trink B. / Brit. J. Cancer. 2011. Vol. 105. P. 1295.
22. Graves D. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2012. Vol. 45 (26). P. 263001.
23. Lya L., Chenga X., Murthya S., Zhuang T., Jones O., Basadonna G., Keidar M., Canady J. / Clinical Plasma Medicine, 2023, in press.
24. <https://www.shebaonline.org/canady-helios-coldplasma-scalpel-for-breast-cancer-treatment> (Применение Canady Helios™ Cold Plasma).
25. Lacoste D. A., Bourdon A., Kuribara K., Urabe K., Stauss S., Terashima K. / Plasma Sources Science and Technology. 2014. Vol. 23. № 6. P. 062006.
26. Chepelev V. M., Chistolinov A. V., Khromov M. A., Antipov S. N., Gadzhiev M. Kh. / J. Phys.: Conf. Ser. 2020. Vol. 1556. P. 012091.
27. Antipov S. N., Sargsyan M. A., Gadzhiev M. Kh. / J. Phys.: Conf. Ser. 2020. Vol. 1698. P. 012029.
28. Chepelev V. M., Chistolinov A. V., Antipov S. N., Gadzhiev M. Kh. / J. Phys.: Conf. Ser. 2021. Vol. 2100. P. 012029.
29. Shimizu T., Steffes B., Pompl R., Jamitzky F., Bunk W., Ramrath K., Georgi M., Stolz W., Schmidt H.-U., Urayama T., Fujii S., Morfill G. E. / Plasma Process. Polym. 2008. Vol. 5. P. 577.
30. Herbst F., Schalkwyk J. V., McGovern M. Comprehensive Clinical Plasma Medicine / Eds. Metelmann H. R., von Woedtke T., Weltmann K. D. – Springer: Cham, 2018.
31. Coulombe S., Le'veille' V., Yonson S., Leask R. L. / Pure Appl. Chem. 2006. Vol. 78. P. 1147.
32. Yu H., Perni S., Shi J. J., Wang D. Z., Kong M. G., Shama G. / J. Appl. Microbiol. 2006. Vol. 101. P. 1323.
33. Sladek R. E., Filoche S. K., Sissons C. H., Stof-fels E. / Lett. Appl. Microbiol. 2007. Vol. 45. P. 318.

PACS: 52.77. –j

A portable source of a volumetric cold plasma jet for biomedical applications

B. B. Baldanov*, A. P. Semenov, and Ts. V. Ranzhurov

*Institute of Physical Material Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Ulan-Ude, 670047 Russia*

** E-mail: baibat@mail.ru*

Received 05.03.2026; revised 03.08.2026; accepted 22.10.2026

A portable plasma sterilizer has been developed that pumps a plasma-forming gas (argon) through a swirler, which creates a helical vortex gas flow in the discharge gap. At a gas flow rate of $>5 \times 10^{-5}$ kg/s, the gas flow swirls, filling the entire cross-sectional area of the anode at the nozzle outlet with streamers. The non-thermal plasma generated in the discharge gap is carried away by the argon flow, forming a cold plasma jet. The bactericidal effect of non-thermal plasma on the vegetative form of Escherichia coli strains has been demonstrated.

Keywords: streamer discharge, nonthermal argon plasma, gas swirler, plasma jet, plasma inactivation of microorganisms.

REFERENCE

1. VanGils C., Hofmann S., Boekema B. K. H. L., Brandenburg R., and Bruggeman P. J., *J. Phys. D Appl. Phys.* **46**, 175203 (2013).
2. Oh J.-S., Szili E. J., Gaur N., Hong S.-H., Furuta H., Kurita H., Mizuno A., Hatta A., and Short R. D., *J. Phys. D Appl. Phys.* **49**, 304005 (2016).
3. Liu Z., Zhou C., Liu D., He T., Guo L., Xu D., and Kong M., *AIP Adv.* **9**, 015014 (2019).
4. Milhan N. V. M., Chiappim W., Sampaio A. D. G., da Cruz Vegian M. R., Pessoa R. S., and Koga-Ito C. Y., *Int. J. Mol. Sci.* **23**, 4131 (2022).
5. Schweigert I., Zakrevsky D., Milakhina E., Gugin P., Biryukov M., Polyakova A., Kryachkova N., Gorbunova E., Epanchintseva A., Pysnaya I., and Koval O., *Plasma Physics Reports* **50**, 1375–1387 (2024).
6. Gherardi M., Tonini R., and Colombo V., *Trends Biotechnol.* **36**, 583–585 (2017).
7. Lata S., Chakravorty S., Mitra T., Pradhan P. K., Mohanty S., Patel P., Jha E., Panda P. K., Verma S. K., and Suar M., *Mater. Today Bio.* **13**, 100200 (2022).
8. Thirumdas R., Kothakota A., Annapure U., Siliveru K., Blundell R., Gatt R., and Valdramidis V. P., *Trends Food Sci. Technol.* **77**, 21–31 (2018).
9. Subramanian P. G., Rao H., Shivapuji A. M., Girard-Lauriault P. L., and Rao L., *J. Appl. Phys.* **129**, 093303 (2021).
10. Zhou R., Zhou R., Wang P., Xian Y., Mai-Prochnow A., Lu X. P., Cullen P. J., Ostrikov K., and Bazaka K., *J. Phys. D Appl. Phys.* **53**, 303001 (2020).
11. Pan J., Li Y. L., Liu C. M., Tian Y., Yu S., Wang K. L., Zhang J., and Fang J., *Plasma Chem. Plasma Process.* **37**, 1091–1103 (2017).
12. Guo J.-J., Li M.-D., Sun Q.-Q., Yang W., Zhou P., Ding S.-J., and Zhang D. W., *Chem. Vap. Depos.* **19**, 156–160 (2013).
13. DeMelo T. F., Rocha L. C., Silva R. P., Pessoa R. S., Negreiros A. M. P., Sales Júnior R., Tavares M. B., and Alves Junior C., *Materials*. **15**, 4854 (2022).
14. Chiappim W., Sampaio A., Miranda F., Fraga M., Petraconi G., Sobrinho A. D. S., Kostov K., Koga-Ito C., and Pessoa R., *Water*. **13**, 1480 (2021).
15. Chiappim W., Sampaio A., Miranda F., Petraconi G., Sobrinho A. S., Cardoso P., Kostov K., Koga-Ito C., and Pessoa R., *Plasma Process. Polym.* **18**, 2100010 (2021).
16. Sampaio A. D. G., Chiappim W., Milhan N. V. M., Neto B. B., Pessoa R., and Koga-Ito C. Y., *Int. J. Mol. Sci.* **23**, 13893 (2022).
17. Živani M., Espona-Noguera A., Lin A., and Canal C., *Adv. Sci.* **10** (8), 2205803 (2023).
18. Keidar M., Shashurin A., Volotskova O., Stepp M., Srinivasan P., Sandler A., and Trink B., *Phys. Plasmas* **20**, 057101 (2013).
19. Fridman G., Fridman G., Gutsol A., Shekhter A., Vasilets V., and Fridman A., *Plasma Process. Polym.* **5**, 503–533 (2008).
20. Huang J., Li H., Chen W., Lv G., Wang X., Zhang G., Ostrikov K., Wang P., and Yang S., *Appl. Phys. Lett.* **99**, 253701 (2011).
21. Keidar M., Walk R., Shashurin A., Srinivasan P., Sandler A., Dasgupta S., Ravi R., Guerrero-Preston R., and Trink B., *Brit. J. Cancer*. **105**, 1295 (2011).
22. Graves D., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **45**, 263001 (2012).
23. Lya L., Chenga X., Murthya S., Zhuang T., Jones O., Basadonna G., Keidar M., and Canady J., *Clinical Plasma Medicine*, , in press. (2023).
24. <https://www.shebaonline.org/canady-helios-coldplasma-scalpel-for-breast-cancer-treatment> (Применение Canady Helios™ Cold Plasma).
25. Lacoste D. A., Bourdon A., Kuribara K., Urabe K., Stauss S., and Terashima K., *Plasma Sources Science and Technology* **23**, 062006 (2014).
26. Chepelev V. M., Chistolinov A. V., Khromov M. A., Antipov S. N., and Gadzhiev M. Kh., *J. Phys.: Conf. Ser.* **1556**, 012091 (2020).
27. Antipov S. N., Sargsyan M. A., and Gadzhiev M. Kh., *J. Phys.: Conf. Ser.* **1698**, 012029 (2020).
28. Chepelev V. M., Chistolinov A. V., Antipov S. N., and Gadzhiev M. Kh., *J. Phys.: Conf. Ser.* **2100**, 012029 (2021).

29. Shimizu T., Steffes B., Pompl R., Jamitzky F., Bunk W., Ramrath K., Georgi M., Stolz W., Schmidt H.-U., Urayama T., Fujii S., and Morfill G. E., Plasma Process. Polym. **5**, 577(2008).
30. Herbst F., Schalkwyk J. V., and McGovern M. Comprehensive Clinical Plasma Medicine / Eds. H. R. Metelmann, T. von Woedtke, K. D. Weltmann. Springer: Cham, 2018.
31. Coulombe S., Le'veille' V., Yonson S., and Leask R. L., Pure Appl. Chem. **78**, 1147 (2006).
32. Yu H., Perni S., Shi J. J., Wang D. Z., Kong M. G., and Shama G., J. Appl. Microbiol. **101**, 1323 (2006).
33. Sladek R. E., Filoche S. K., Sissons C. H., and Stoffels E., Lett. Appl. Microbiol. **45**, 318 (2007).

Об авторах

Балданов Баир Батоевич, заведующий лабораторией, д.т.н., Институт физического материаловедения СО РАН (670047, г. Улан-Удэ, Россия). E-mail: baibat@mail.ru SPIN-код: 1046-6128, AuthorID: 580609

Семенов Александр Петрович, главный научный сотрудник, профессор, д.т.н., Институт физического материаловедения СО РАН (670047, г. Улан-Удэ, Россия). E-mail: alexandersemenov2018@mail.ru SPIN-код: 8786-3514, AuthorID: 1700

Ранжуров Цыремпил Валерьевич, научный сотрудник, Институт физического материаловедения СО РАН (670047, г. Улан-Удэ, Россия). E-mail: ts_ranjurov@mail.ru SPIN-код: 9601-7136, AuthorID: 42199