

**Инактивация микроорганизмов на плоских поверхностях
барьерным разрядом***В. А. Панов, Л. М. Василяк, С. П. Ветчинин, Е. А. Дешева, В. Я. Печеркин, Э. Е. Сон*

Экспериментально исследована инактивация споровых микроорганизмов на диэлектрической поверхности барьерным разрядом с плоскими электродами. Показано, что при средней удельной мощности разряда $0,3 \text{ Вт/см}^3$ эффективность обеззараживания составляет три порядка за времена экспозиции в интервале $0,5\text{--}60$ секунд, причем слабо зависит от времени экспозиции.

Ключевые слова: барьерный разряд, плазма, обеззараживание, бактерии, грибы.

Введение

Диэлектрический барьерный разряд [1] является одним из наиболее эффективных способов получения объемной и приповерхностной плазмы в различных плазменных и плазмохимических технологиях, например, для очистки поверхностей, воды и воздуха, для дезинфекции и в плазменной медицине [1–4]. Способы получения барьерного разряда и геометрия разрядных промежутков могут быть разными, при этом условно их можно разделить на три группы: скользящие разряды, в которых образующаяся плазма в виде тонкого слоя движется вдоль поверхности диэлектрика; барьерные разряды, в которых образующиеся в промежутке стримеры прорастают по нормали к плоскости диэлектрика, перекрывающего разрядный промежуток между двумя электродами; плазменные струи, которые

выходят наружу из разрядного промежутка. Выбор между этими группами зависит от задачи и условий применения или возникновения (иногда нежелательного!) барьерного разряда.

Скользкий разряд может возникать на поверхности кабелей или изоляторов, и в этом случае он является вредным явлением, которое необходимо устранять. Для применений в скоростных коммутаторах, в плазменной аэродинамике или для модификации и очистки поверхностей скользящий разряд является очень эффективным. Для дезинфекции и плазменной медицины, в основном, применяют барьерный разряд с диэлектриком около высоковольтного электрода или плазменные струи. Плазмохимические реакторы на основе барьерного разряда широко применяются для получения озона [5, 6], в том числе при промышленном обеззараживании воды озоном, для получения оксида азота NO для медицинских целей [7, 8]. Воздействие плазмы атмосферного давления на поверхность полимера позволяет модифицировать его поверхность и изменять её свойства [1, 9, 10], такие как смачивание, адгезия, гидрофильность, гидрофобность, а также для нанесения антимикробных покрытий [11], которые зависят как от природы полимера, так и от свойств плазмы, характеристик разряда и природы плазмообразующего газа.

Электрический разряд, в том числе барьерный разряд, также активно применяется в методах и технологиях синтеза наноматериалов. Исследуется применение поверхностного диэлектрического барьерного разряда для управления высокоскоростными воздушными потоками вблизи поверхности летательных аппаратов путем воздействия на пограничный слой [12]. Барьерный разряд может применяться для создания мощных потоков резонансного ультрафиолетового (УФ)

Панов Владислав Александрович¹, научный сотрудник.

Василяк Леонид Михайлович¹, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н.

Ветчинин Сергей Петрович¹, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.

Дешева Елена Андреевна², ведущий научный сотрудник.

Печеркин Владимир Яковлевич¹, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.

Сон Эдуард Евгеньевич¹, зам. директора ОИВТ РАН, д.ф.-м.н., академик РАН.

¹Объединенный институт высоких температур РАН. Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2. Тел. +7(495) 484-18-10.

E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru, vpecherkin@yandex.ru, son.eduard@gmail.com

²Институт медико-биологических проблем РАН. Россия, 123007, Москва, Хорошевское шоссе, 76а. E-mail: deshevaya@imbpr.ru

Статья поступила в редакцию 2 октября 2017 г.

излучения вакуумного и бактерицидного диапазонов с помощью эксимерных ламп [13–15] для очистки воды и воздуха от загрязнений, [16, 17], в том числе от микробиологических.

В настоящее время все большую актуальность приобретают работы, направленные на исследование барьерного разряда и свойств газоразрядных процессов, определяющих возможности их применения для обработки пищевых продуктов [18], для обеззараживания, стерилизации и плазменной медицины [19–24].

Особенно важной задачей является задача обеззараживания и дезинфекции поверхностей в замкнутых помещениях, в которых могут находиться люди в течение длительного времени, например, на космических станциях, в том числе и для защиты промышленных материалов, оборудования, электроники от биоповреждений и микробиологически индуцированной коррозии. В таких помещениях применение общепринятых химических дезинфектантов ограничено или невозможно, по-

этому применение физических методов является важной практической задачей. Из физических методов приемлемыми, по сути, являются два: обработка ультрафиолетовым излучением и обработка холодной плазмой.

Целью настоящей работы является исследование эффективности инактивации спорных штаммов микроорганизмов, выделенных из среды обитания МКС и нанесенных на поверхность диэлектрических материалов, барьерным разрядом с плоскими электродами при атмосферном давлении воздуха.

Экспериментальная часть

Для исследования обеззараживающего действия плазмы барьерного разряда на микроорганизмы использовалась экспериментальная установка, принципиальная схема которой представлена на рис. 1.

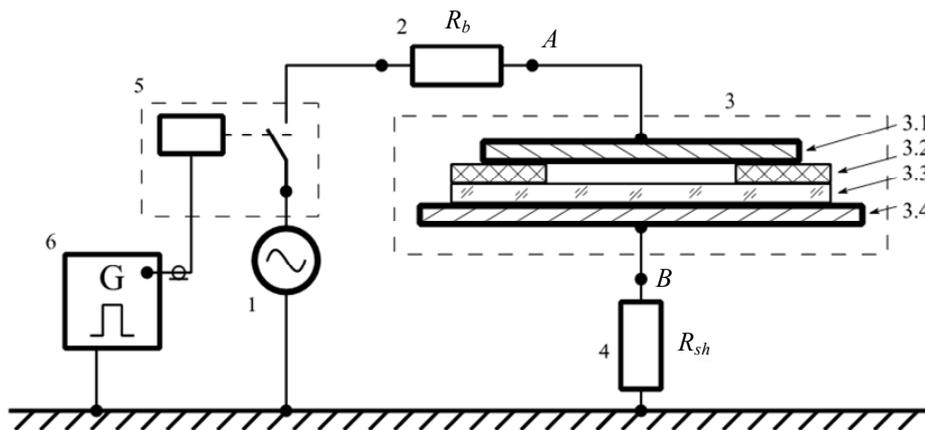


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 – источник переменного напряжения; 2 – балластное сопротивление; 3 – ячейка для плазменной обработки: 3.1 – высоковольтный электрод, 3.2 – изоляторы (два, расположены симметрично с обеих сторон), 3.3 – предметное стекло с обрабатываемым образцом культуры, 3.4 – нижний (низковольтный) электрод; 4 – токовый шунт; 5 – реле включения/отключения питания; 6 – генератор импульсов.

Барьерный разряд реализуется в ячейке (3) в зазоре, образованном нижней поверхностью высоковольтного электрода (3.1) и верхней поверхностью предметного стекла (3.3) толщиной 2,5 мм при нормальном давлении воздуха. Величина зазора и эффективная площадь обработки регулируются высотой изолирующих элементов (3.2) и их положением. Эффективная площадь обработки уменьшается при сближении изоляторов и увеличивается при их удалении. В экспериментах они выбираются таким образом, чтобы достичь желаемого уровня мощности в расчете на один квадратный сантиметр и для более равномерного распределения свечения в зазоре.

Образец исследуемой культуры располагается на плоскости предметного стекла, обращенной к высоковольтному электроду, и нанесен на нее в центре в виде круглого пятна с диаметром около 15 мм. Для поджига и поддержания барьерного разряда используется источник (1), на выходе которого формируется напряжение синусоидальной формы с частотой 17,7 кГц. Величина тока через разрядный промежуток задается величиной балластного сопротивления (2). Управление временем обработки образца осуществляется при помощи реле (5), управляемым генератором импульсов (6) с возможностью точной установки времени замкнутого состояния реле.

Напряжение и ток на ячейке измерялись в точках *A* и *B* с помощью осциллографа LeCroy HDO4054. Напряжение в точке *A* регистрировалось при помощи пассивного пробника напряжения Tektronix P6015A. Величина тока определялась по падению напряжения на токовом шунте R_{sh} . При измерении напряжения на ячейке величиной падения напряжения на токовом шунте можно пренебречь, т. к. его сопротивление составляет 5 Ом и мало по сравнению с величиной сопротивления электроразрядной ячейки с разрядом.

Для исследования использовались штаммы микроорганизмов следующих видов: спорообразующая бактерия (*Bacillus pumilus*) и грибок (*Aspergillus niger*), выделенные из среды обитания МКС. Эти микроорганизмы были выбраны на основании того, что споры этих микроорганизмов обладают чрезвычайно высокой резистивностью по отношению к химической обработке и обработке ультрафиолетовым излучением в сравнении с обычно используемыми для тестов микроорганизмами *Staphylococcus aureus* и *E. Coli*. Засев микроорганизмами образцов стекол, помещенных в стерильные чашки Петри, осуществляли путем нанесения капли суспензии приготовленной водной взвеси спор бактерии и гриба на поверхность стекла с помощью пипетки из расчета 10^6 – 10^4 колониеобразующих единиц (КОЕ) в капле.

Было подготовлено 24 образца для двух серий испытаний: 12 образцов с содержанием « 10^6 КОЕ/образец *Bacillus pumilus* + 10^5 КОЕ/образец *Aspergillus niger*» в исходной капле каждого образца, и 12 образцов с содержанием « 10^4 КОЕ/образец *Bacillus pumilus* + 10^3 КОЕ/образец *Aspergillus niger*».

После нанесения суспензии опытные и контрольные образцы выдерживались в изолированном боксе до практически полного высыхания капель. Для определения степени инактивации, контаминированные микроорганизмами поверхности опытных образцов, подвергались воздействию барьерного разряда в течение заданной длительности в диапазоне от 0,5 до 60 с. При каждой экспозиции барьерным разрядом обрабатывали по два опытных образца. Для каждого времени обработки и исходного количества. Два контрольных образца для каждой серии не подвергались воздействию барьерного разряда.

Определение содержания каждой тест-культуры микроорганизма на контрольных и опытных образцах стекол проводилось следующим образом. С поверхности каждого образца методом смыва проводился отбор пробы стерильным тампоном COPAN FLOQ 552C, предварительно смоченным в стерильном физиологическом растворе. Далее в каждый тампон наливали по 2 мл

физиологического раствора, помещали в вихревую мешалку и интенсивно встряхивали в течение 10–15 секунд. После этого проводили посев смывов на поверхности соответствующих питательных сред, разлитых в чашки Петри, посеы инкубировали и учитывали количество выросших колоний бактерий и грибов с погрешностью 5–7 %.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Характерные осциллограммы тока и напряжения барьерного разряда представлены на рис. 2.

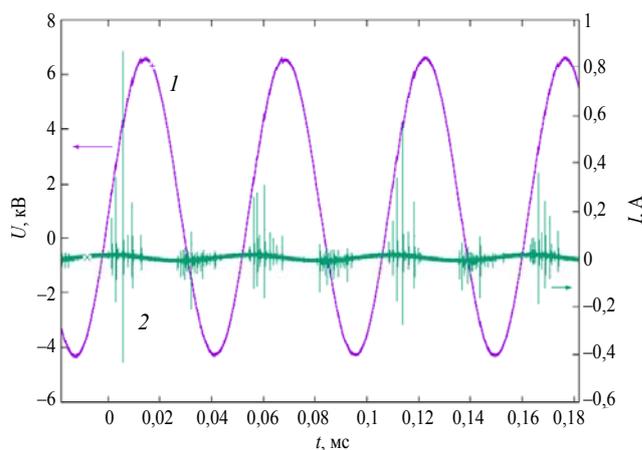


Рис. 2. Осциллограммы напряжения *U* (1) и тока *I* (2) барьерного разряда. Межэлектродное расстояние 0,25 мм. Площадь разряда 3 см².

Активная мощность, которая выделяется в промежутке в моменты его замыкания каналами разряда, определяется по осциллограммам напряжения и тока барьерного разряда (см. рис. 2). Для оценки её среднего значения на достаточно большом промежутке времени (порядка 50 мс) численным интегрированием вычислялось значение вложенной энергии при импульсах тока, соответствующих замыканиям промежутка каналами разряда (токовые всплески на фоне ёмкостной синусоидальной составляющей), при этом в качестве падения потенциала брались скачки на осциллограммах напряжения в момент протекания импульса тока (около 200 В), а затем полученное значение энергии нормировалось на время интегрирования. Полученная таким образом оценка дает значение объемной удельной мощности на уровне 0,3 Вт/см³, а затраты плотности мощности для обработки поверхности составили около 8 мВт/см².

Численность микроорганизмов, выживших после воздействия барьерного разряда на поверхности стеклянного образца, представлена в таблице.

Таблица

Среднее значение численности бактерий и грибов до и после воздействия барьерного разряда при различной длительности обработки, (КОЕ/образец)

Тест-культура	Исходное количество (контроль)	Длительность обработки, 0,5 с	Длительность обработки, 1 с	Длительность обработки, 5 с	Длительность обработки, 10 с	Длительность обработки, 60 с
<i>Bacillus pumilus</i>	$4,2 \times 10^6$	$2,6 \times 10^3$	$2,4 \times 10^3$	$1,6 \times 10^3$	$1,7 \times 10^3$	$1,8 \times 10^3$
	$4,0 \times 10^4$	$1,1 \times 10^2$	$1,4 \times 10^2$	$6,5 \times 10^1$	$5,5 \times 10^2$	$8,4 \times 10^1$
<i>Aspergillus niger</i>	$1,2 \times 10^5$	$5,5 \times 10^2$	$3,8 \times 10^2$	$1,2 \times 10^2$	$1,1 \times 10^2$	$8,0 \times 10^1$
	$1,4 \times 10^3$	0	0	5	0	0

Погрешность определения численности бактерий и грибов до и после воздействия составляла не более 7 %.

Из представленных данных видно, что при высоких уровнях микробной обсемененности поверхности стекла (10^6 и 10^5 КОЕ/образец) воздействие барьерного разряда снижало количество бактерий в образце на три порядка при длительности обработки от 0,5 с до 60 с, грибов – на три порядка при длительности обработки от 0,5 до 10 с, а в течение 60 с – почти на четыре порядка. Энергетические затраты при этом составляли от 4 мДж/см² до 0,5 Дж/см².

При снижении уровня исходной контаминации поверхности стекла (10^5 и 10^3 КОЕ/образец) не было выявлено четкой закономерности снижения численности спорообразующих бактерий от времени действия барьерного разряда. Для грибов установлено, что при уровне исходного заражения $1,4 \times 10^3$ КОЕ/образец после воздействия барьерного разряда количество выживших спор грибов на поверхности стекол составляло менее 10 КОЕ/образец.

Подчеркнем, что при всех исследованных исходных количествах спор микроорганизмов максимальная степень инактивации достигается уже через 0,5 с воздействия барьерным разрядом и при увеличении длительности обработки незначительно увеличивается. Возможно, что уменьшение эффективности инактивации во времени связано с неоднородностью разряда и привязкой разрядных каналов к выделенным точкам на обрабатываемой поверхности [25, 26].

Для сравнения важно отметить, что при воздействии УФ-излучением бактерицидного диапазона для инактивации спор микроорганизмов на один порядок требуются следующие поверхностные дозы: для грибов вида *Aspergillus niger* – 0,315 Дж/см², для бактерий вида *Bacillus pumilus* – 0,05 Дж/см² [27]. Если учесть, что максимальный КПД (30–37 %) преобразования электрической энергии в УФ-излучение бактерицидного диапазона можно достичь с помощью ламп низкого давления, то полные затраты электроэнергии будут почти в три раза больше. Следовательно, энерге-

тические затраты для инактивации грибов барьерным разрядом будут на 1–2 порядка меньше, а, соответственно, и длительность обработки будет намного короче, чем при обработке УФ-излучением, что является существенным преимуществом при обработке замкнутых помещений в присутствии людей.

Возможно, более высокая эффективность барьерного разряда в отношении споровых форм грибов объясняется тем, что при обработке поверхностей барьерным разрядом или холодной плазменной струей основным механизмом разрушения и гибели микроорганизмов является химическое воздействие на них радикалами ОН и другими активными частицами, образующимися в разряде [28–30].

Следует также отметить, что в работе [31] при воздействии холодной плазменной струей для инактивации численности бактерий на один порядок требуются длительности облучения на уровне нескольких минут, что гораздо больше, чем в нашем барьерном разряде. В работе [32] исследовано воздействие холодной плазменной струей из барьерного разряда на культуру микроорганизма *Staphylococcus aureus* (штамм АТСС 209). Для этого взвесей суточных культур в количестве 2×10 КОЕ засеивали на чашки Петри с питательной средой. Опытные чашки обрабатывали в воздухе различное время на расстоянии 4,5 мм от плазменных струй. В результате, для времен экспозиции 15, 30 и 120 с были получены значения $0,14 \pm 0,08 \times 10^3$; $0,24 \pm 0,11 \times 10^3$; $0,25 \pm 0,12 \times 10^3$ КОЕ соответственно. Т. е. вне зависимости от времени обработки концентрация жизнеспособных микроорганизмов была снижена примерно на порядок.

Заключение

В результате проведенных в работе экспериментов установлено, что непосредственное воздействие барьерного разряда со средней удельной мощностью 0,3 Вт/см³ на диэлектрическую гладкую поверхность, контаминированную микроорганизмами, выделенными из среды обитания МКС, за экспозиционное время от 0,5 до 60 с сни-

жает на два-три порядка количество спорообразующих бактерий и на три-четыре порядка количество спор плесневых грибов. Установлено, что при максимальном уровне исходного количества спор КОЕ в образцах достаточно высокая степень инактивации достигается уже через 0,5 с и при дальнейшем увеличении времени воздействия разряда степень инактивации увеличивается незначительно.

Работа поддержана программой РАН IV.4.10 "Фундаментальные проблемы физической и химической механики для экспериментов на МКС".

ЛИТЕРАТУРА

1. Kogelschatz U. // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2003. Vol. 23. No. 1. P. 1.
2. Zhang Z., Xu Z., Cheng C., Wei J., Lan Ya., Ni G., Sun Q., Qian S., Zhang H., Xia W., Shen J., Meng Y., Chu P. K. // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2017. Vol. 37. Issue 2. P. 415.
3. Ma Y., Chen J. R., Yang B., Pu S. C., Yu Q. S. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2014. Vol. 42. No. 6. P. 1607.
4. Laroussi M. // Plasma Processes and Polymers. 2014. Vol. 11. No. 12. P. 1138.
5. Yuan D., Ding C., He Y., Wang Z., Kumar S., Zhu Ya., Cen K. // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2017. Vol. 37. Issue 4. P. 1165.
6. Vezzu G., Lopez J. L., Freilich A., and Becker K. H. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2009. Vol. 37. No. 6. P. 890.
7. Malik M. A. // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2016. Vol. 36. Issue 3. P. 737.
8. Vasilets V. N., Shekhter A. B. Nitric oxide plasma sources for bio-decontamination and plasma therapy. P. 393. In: Machala Z., Hensel K., Akishev Y. (eds) Plasma for Bio-Decontamination, Medicine and Food Security. NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology. – Springer: Dordrecht, 2012.
9. Homola T., Krumpolec R., Zemánek M., Kelar J., Synek P., Hoder T., Černák M. // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2017. Vol. 37. Issue 4. P. 1149.
10. Abourayana H. M., Milosavljević V., Dobbyn P., Dowling D. P. // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2017. Vol. 37. Issue 4. P. 1223.
11. Onsuratoom S., Rujiravanit R., Sreethawong T., Tokura S., Chavadej S. // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2010. Vol. 30. No. 1. P. 191.
12. Enloe C. L., McLaughlin T. E., Dyken R. D., Kachner K. D., Jumper E. J., Corke T. C., Post M., Haddad O. // AIAA J. 2004. Vol. 42. No. 3. P. 595.
13. Lomaev M. I., Sosnin E. A., Tarasenko V. F. // Progress in Quantum Electronics. 2012. Vol. 36. Issue 1. P. 51.
14. Florez D., Diez R., Piquet H. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2016. Vol. 44. No. 7. P. 1160–1168.
15. Matafonova G., Batoev V. // Chemosphere. 2012. Vol. 89. No. 6. P. 637.
16. Kuroki T., Oishi T., Yamamoto T., Okubo M. // IEEE Trans. Ind. Appl. 2013. Vol. 49. No. 1. P. 293.
17. Bo W. // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2017. Vol. 37. Issue 4. P. 1121.
18. Misra N. N., Martynenko A., Chemat F., Paniwnyk L., Barba F. J., Jambrak A. R. // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2017. Vol. 41. P. 1.
19. Machala Z., Hensel K., Akishev Yu. (Eds.) Plasma for Bio-Decontamination, Medicine and Food Security. NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology. – Springer: Dordrecht, 2012.
20. Fridman A., Friedman G. Plasma Medicine. – John Wiley & Sons, 2013.
21. Graves D. B. // Physics of Plasmas. 2014. Vol. 21. 080901.
22. Ermolaeva S. A., Sysolyatina E. V., Kolkova N. I., Bortsov P., Tuhvatulin A. I., Vasiliev M. M., Mukhachev A. Y., Petrov O. F., Tetsuji S., Naroditsky B. S., Morfill G. E., Fortov V. E., Grigoriev A. I., Zigangirova N. A., Gintsburg A. L. // Journal of Medical Microbiology. 2012. Vol. 61. Issue 6. P. 793.
23. Sysolyatina E., Vasiliev M., Kurnaeva M., Kornienko I., Petrov O., Fortov V., Gintsburg A., Petersen E., Ermolaeva S. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2016. Vol. 49. P. 294002.
24. Sasaki T., Hida S., Ito R., Kondo Y., Takahashi K., Kikuchi T., Harada N., Ohnuma K. // IEEE Transactions on Fundamentals and Materials. 2017. Vol. 137. P. 328.
25. Babaeva N. Yu., Kushner M. J. // Plasma Sources Sci. Technol. 2014. Vol. 23. P. 065047.
26. Babaeva N. Yu., Tian W., Kushner M. J. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2014. Vol. 47. P. 235201.
27. Kowalski W. Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook UVGI for Air and Surface Disinfection – Heidelberg Dordrecht London New York: Springer, 2009.
28. Lu X., Naidis G. V., Laroussi M., Reuter S., Graves D. B., Ostrikov K. // Physics Reports. 2016. Vol. 630. P. 1.
29. Lin A., Chernets N., Han J., Alicea Y., Dobrynin D., Fridman G., Freeman T. A., Fridman A., Miller V. // Plasma Process. Polym. 2015. Vol. 12. P. 1117.
30. Graves D. B. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2012. Vol. 45. P. 263001.
31. Ermolaeva S. A., Varfolomeev A. F., Chernukha M. Y., Yurov D. S., Vasiliev M. M., Kaminskaya A. A., Moisevich M. M., Romanova J. M., Murashev A. N., Selezneva Shimizu T., Sysolyatina E. V., Shaginyan I. A., Petrov O. F., Mayevsky E. I., Fortov V. E., Morfill G. E., Naroditsky B. S., Gintsburg A. L. // Journal of Medical Microbiology. 2011. Vol. 60. P. 75.
32. Жданова О. С., Кузнецов В. С., Панарин В. А., Скакун В. С., Соснин Э. А., Тарасенко В. Ф. // Прикладная физика. 2016. № 2. С. 36.

PACS: 52.80.Tn

Inactivation of microorganisms on a plain surface by the barrier discharge

V. A. Panov¹, L. M. Vasilyak¹, S. P. Vetchinin¹, E. A. Deshevaya², V. Ya. Pecherkin¹, and E. E. Son¹

¹ Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences
Bd. 2, 13 Izhorskaya str., Moscow, 125412, Russia
E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru, vpecherkin@yandex.ru, son.eduard@gmail.com

² Institute of Biomedical Problems of Russian Academy of Sciences
76a Khoroshevskoye shosse, 123007, Russia
E-mail: deshevaya@imbp.ru

Received October 2, 2017

Inactivation of a dielectric surface contaminated with sporous microorganisms and fungus by barrier discharge with plain electrodes has been studied experimentally. Under average discharge power of 0.3 W/cm², the decontamination efficiency is three orders of magnitude for the exposure time of 0.5–60 s and depends little on the exposure time.

Keywords: barrier discharge, plasma, disinfection, microorganisms, fungi.

REFERENCES

1. U. Kogelschatz, *Plasma Chemistry and Plasma Processing* **23**, 1 (2003).
2. Z. Zhang, Z. Xu, C. Cheng, J. Wei, Ya. Lan, G. Ni, Q. Sun, S. Qian, H. Zhang, W. Xia, J. Shen, Y. Meng, and P. K. Chu, *Plasma Chemistry and Plasma Processing* **37**, 415 (2017).
3. Y. Ma, J. R. Chen, B. Yang, S. C. Pu, and Q. S. Yu, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **42**, 1607 (2014).
4. M. Laroussi, *Plasma Processes and Polymers* **11**, 1138 (2014).
5. D. Yuan, C. Ding, Y. He, Z. Wang, S. Kumar, Ya. Zhu, and K. Cen, *Plasma Chemistry and Plasma Processing* **37**, 1165 (2017).
6. G. Vezzu, J. L. Lopez, A. Freilich, and K. H. Becker, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **37**, 890 (2009).
7. M. A. Malik, *Plasma Chemistry and Plasma Processing* **36**, 737 (2016).
8. V. N. Vasilets and A. B. Shekhter, in *Plasma for Bio-Decontamination, Medicine and Food Security. NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology*. Ed. by Z. Machala, K. Hensel, Y. Akishev (Springer, Dordrecht, 2012). P. 393.
9. T. Homola, R. Krumpolec, M. Zemánek, J. Kelar, P. Synek, T. Hoder, and M. Černák, *Plasma Chemistry and Plasma Processing* **37**, 1149 (2017).
10. H. M. Abourayana, V. Milosavljević, P. Dobbyn, and D. P. Dowling, *Plasma Chemistry and Plasma Processing* **37**, 1223 (2017).
11. S. Onsuratoom, R. Rujiravanit, T. Sreethawong, S. Tokura, and S. Chavadej, *Plasma Chemistry and Plasma Processing* **30**, 191 (2010).
12. C. L. Enloe, T. E. McLaughlin, R. D. van Dyken, K. D. Kachner, E. J. Jumper, T. C. Corke, M. Post, and O. Haddad, *AIAA J.* **42**, 595 (2004).
13. M. I. Lomaev, E. A. Sosnin, and V. F. Tarasenko, *Progress in Quantum Electronics* **36**, 51 (2012).
14. D. Florez, R. Diez, and H. Piquet, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **44**, 1160 (2016).
15. G. Matafonova and V. Batoev, *Chemosphere* **89**, 637 (2012).
16. T. Kuroki, T. Oishi, T. Yamamoto, and M. Okubo, *IEEE Trans. Ind. Appl.* **49**, 293 (2013).
17. W. Bo, *Plasma Chemistry and Plasma Processing* **37**, 1121 (2017).
18. N. N. Misra, A. Martynenko, F. Chemat, L. Paniwnyk, F. J. Barba, and A. R. Jambrak, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* **41**, 1 (2017).
19. *Plasma for Bio-Decontamination, Medicine and Food Security. NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology*. Ed. by Z. Machala, K. Hensel, Y. Akishev (Springer, Dordrecht, 2012).
20. A. Fridman and G. Friedman. *Plasma Medicine* (John Wiley & Sons, 2013).
21. D. B. Graves, *Physics of Plasmas* **21**, 080901 (2014).
22. S. A. Ermolaeva, E. V. Sysolyatina, N. I. Kolkova, P. Bortsov, A. I. Tuhvatulin, M. M. Vasiliev, A. Y. Mukhachev, O. F. Petrov, S. Tetsuji, B. S. Naroditsky, G. E. Morfill, V. E. Fortov, A. I. Grigoriev, N. A. Zigangirova, and A. L. Gintsburg, *Journal of Medical Microbiology* **61**, 793 (2012).
23. E. Sysolyatina, M. Vasiliev, M. Kurnaeva, I. Kornienko, O. Petrov, V. Fortov, A. Gintsburg, E. Petersen, and S. Ermolaeva, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **49**, 294002 (2016).
24. T. Sasaki, S. Hida, R. Ito, Y. Kondo, K. Takahashi, T. Kikuchi, N. Harada, and K. Ohnuma, *IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials* **137**, 328 (2017).
25. N. Yu. Babaeva and M. J. Kushner, *Plasma Sources Sci. Technol.* **23**, 065047 (2014).
26. N. Yu. Babaeva, W. Tian, and M. J. Kushner, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **47**, 235201 (2014).
27. W. Kowalski. *Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook UVGI for Air and Surface Disinfection* (Springer, Heidelberg, Dordrecht, London, New York, 2009).
28. X. Lu, G. V. Naidis, M. Laroussi, S. Reuter, D. B. Graves, and K. Ostrikov, *Physics Reports* **630**, 1 (2016).
29. A. Lin, N. Chernets, J. Han, Y. Alicea, D. Dobrynin, G. Fridman, T.A. Freeman, A. Fridman, and V. Miller, *Plasma Process Polym.* **12**, 1117 (2015).
30. D. B. Graves, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **45**, 263001 (2012).
31. S. A. Ermolaeva, A. F. Varfolomeev, M. Y. Chernukha, D. S. Yurov, M. M. Vasiliev, A.A. Kaminskaya, M. M. Moiseyevich, J. M. Romanova, A. N. Murashev, T. Selezneva Shimizu, E. V. Sysolyatina, I. A. Shaginyan, O. F. Petrov, E. I. Mayevsky, V. E. Fortov, G. E. Morfill, B. S. Naroditsky, and A. L. Gintsburg, *Journal of Medical Microbiology* **60**, 75 (2011).
32. O. S. Zhdanova, V. S. Kuznetsov, V. A. Panarin, V. S. Skakun, E. A. Sosnin, and V. F. Tarasenko, *Prikl. Fiz.*, No. 2, 36 (2016).