

УДК 606:62; 621.039.6; 533.9.08

## ВОЗДЕЙСТВИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЫ НА ГРИБЫ РОДА ASPERGILLUS, КОЛОНИЗИРУЮЩИЕ БУМАГУ

А.А. АРАШКОВА<sup>1</sup>, И.А. ГОНЧАРОВА<sup>1</sup>, В.А. ЛЮШКЕВИЧ<sup>2</sup>, И.И. ФИЛАТОВА<sup>2</sup>,  
Н.И. ЧУБРИК<sup>2</sup>, С.И. МАДВЕЙКО<sup>3</sup>, С.В. БОРДУСОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт микробиологии НАН Беларуси  
Академика Купревича 2, 220141, Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Институт физики НАН Беларуси  
пр. Независимости 68, 220072, Минск, Беларусь

<sup>3</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 22 ноября 2016

Изучено влияние низкотемпературной плазмы ВЧ, СВЧ и барьерного разрядов на жизнеспособность грибов-колонизаторов бумаги рода *Aspergillus*. Выявлена высокая эффективность плазмы барьерного разряда по сравнению с другими типами разрядов для деконтаминации материалов на биополимерной основе.

*Ключевые слова:* плесневые грибы, низкотемпературная плазма, высокочастотный, сверхвысокочастотный и барьерный разряды, оптическая эмиссионная спектроскопия.

### Введение

Процессы деструкции широкого круга материалов и изделий природного и искусственного происхождения в значительной степени связаны с жизнедеятельностью микроорганизмов. Основную группу агентов биоповреждения материалов на бумажной основе составляют микроскопические мицелиальные грибы, вырабатывающие «агрессивные» метаболиты, способные вызывать деградацию целлюлозы [1]. Некоторые виды микромицетов не только активно разрушают бумагу, но также могут вызывать ее пигментирование [2].

Особой проблемой является распространение плесневых грибов во внутренней среде музеев, библиотек, медицинских учреждений, что, наряду с микоповреждениями книг, документов, экспонатов, становится опасным для здоровья посетителей и сотрудников в связи с разнообразным негативным влиянием микромицетов на организм человека (микогенная аллергия, микотоксикозы и оппортунистические микозы). Наиболее опасными среди условно-патогенных микромицетов являются грибы рода *Aspergillus*, частота выявления сенсibilизации к которым может превышать 60 % [3].

Для подавления жизнеспособности патогенных микроорганизмов и других контаминантов, включая плесневые грибы, в последние годы предлагается использование низкотемпературной неравновесной плазмы газового разряда [4–6], в том числе высокочастотного [5] и барьерного [6] разрядов. Присутствие в плазменной среде значительной концентрации биоцидных компонентов при невысокой газовой температуре позволяет применять газоразрядную плазму для непосредственной деконтаминации биологических объектов, а также материалов на основе биополимеров [7].

Целью данной работы было исследование влияния низкотемпературной газоразрядной плазмы на грибы рода *Aspergillus*, колонизирующие бумагу. Обработку проводили в широком диапазоне режимов воздействия и параметров плазмы, реализующихся при использовании ВЧ и СВЧ разрядов низкого давления и барьерного разряда атмосферного давления.

### Методика эксперимента

Сверхвысокочастотный (СВЧ) разряд возбуждался в цилиндрической кварцевой трубке длиной 340 мм, расположенной в центре СВЧ резонатора, с наружным диаметром 200 мм. В качестве СВЧ источника использовался магнетрон М-112, генерирующий излучение на частоте  $f_{micr} = 2,45 \pm 0,05$  ГГц. Выходная мощность СВЧ разряда на согласованную нагрузку составляла порядка 650 Вт. Обработку проводили в воздухе при давлении  $\sim 120$  Па. Продолжительность обработки составляла 1–5 мин. ВЧ емкостной разряд возбуждался на частоте 5,28 МГц в разрядной камере установки на основе промышленного генератора высокочастотного тока «ВЧИ-62-5-ИГ-101» в атмосфере воздуха при давлении 200 Па [8]. Длительность обработки – 20 мин.

Барьерный разряд возбуждался между изолированным цилиндрическим высоковольтным электродом и заземленной металлической поверхностью. Задающий генератор источника питания барьерного разряда работал на частоте 1 кГц. Образцы размещали на заземленном электроде. Расстояние между высоковольтным и заземленным электродом  $l$  варьировали от 2 мм до 4 мм. Рабочие режимы: амплитуда напряжения – 20 кВ, выходная мощность – 30 Вт, длительность обработки – 3 мин и 30 мин. Регистрацию спектров излучения плазмы проводили с использованием автоматизированного спектрометрического комплекса на основе светосильного монохроматора серии MS 3504 («СОЛАР ТИИ», Беларусь). В процессе обработки контролировали газокинетическую температуру  $T_g$  плазмы в соответствии с методикой [9].

Для изучения антифунгального эффекта плазмы использовали образцы бумаги, колонизированной грибом *A. niger*, отличающимся способностью выделять значительные количества органических кислот. На поверхность стерильной бумаги наносили сетчатый слой агаризованной среды Чапека-Докса, инокулированной спорами гриба, и инкубировали при 28° С в течение 1 сут до образования мицелия, до стадии спороношения – 3 сут.

Оценку микробной обсемененности бумаги до и после обработки плазмой проводили методом посева серийных разведений смывов на агаризованную питательную среду с последующим подсчетом колониеобразующих единиц (КОЕ) и оценкой ростовых характеристик: скорости роста мицелия (диаметр колоний), интенсивности спороношения и пигментообразования. Уровень продукции органических кислот оценивали по ширине зоны просветления мелового агара и желтого окрашивания рН индикатора (бромкрезоловый пурпурный) вокруг колоний грибов в чашках Петри [10].

### Результаты и их обсуждение

Обработка спор *A. niger* в плазме СВЧ разряда в течение 1 мин способствовала увеличению интенсивности спороношения гриба. Для достижения фунгицидного эффекта по отношению к грибам *A. niger* минимальное время воздействия СВЧ плазмы составило 3 мин, однако увеличение длительности обработки сопровождалось нагревом образцов до 90°С, что накладывает ограничения на использование СВЧ плазмы для деконтаминации термочувствительных материалов на основе природных биополимеров.

Термическое воздействие СВЧ плазмы устраняли путем размещения образцов в зоне послесвечения, на расстоянии 15–25 см от источника СВЧ излучения. При этом *A. niger* не только не утратил жизнеспособность, но имел более высокую скорость роста. Диаметр колоний *A. niger* после обработки в послесвечении СВЧ-плазмы в течение 5 мин был почти на 40 % больше, чем в контроле спустя 30 сут роста при пониженной температуре (15 °С) Подобный стимулирующий эффект при воздействии СВЧ-излучения на микроорганизмы описан в [11].

Кроме того, увеличилась интенсивность выделения органических кислот, о чем свидетельствовали зоны просветления мелового агара вокруг колоний *A. niger* вследствие растворения карбоната кальция органическими кислотами (рис. 1). При микроскопировании выявлено присутствие бипирамидальных форм кристаллогидратов, указывающих на наличие оксалата кальция, образовавшегося за счет выделения грибами щавелевой кислоты, которая относится к числу наиболее «агрессивных» метаболитов [12].

Анализ физиолого-биохимических свойств *A. niger* после 20 мин обработки бумаги ВЧ

плазмой показал, что количество КОЕ *A.niger* снизилось в 3–15 раз, а не утратившие жизнеспособность споры дали колонии, характеризующиеся увеличением скорости роста мицелия, усилением спорообразования и выделением желтого пигмента. При этом изолированное вакуумное воздействие на жизнеспособность *A.niger* практически не влияло – интенсивность роста и спороношения была аналогична контролю (табл. 1).

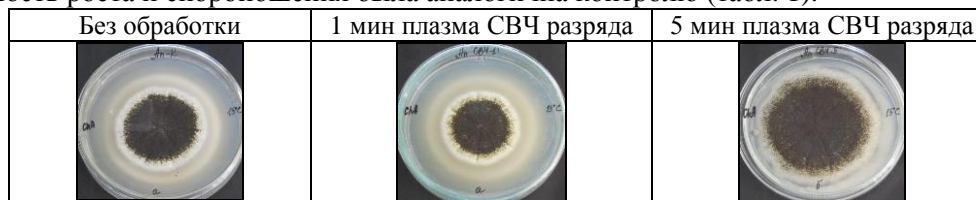


Рис. 1. Рост колоний *A.niger* после обработки СВЧ плазмой на меловом агаре спустя 30 суток культивирования при 15 °С

Таблица 1. Культуральные признаки *A.niger* через 3 суток культивирования на среде Чапека-Докса после 20 мин обработки вакуумом и низкотемпературной плазмой ВЧ разряда

Вариант	Диаметр колоний, мм		Интенсивность спороношения*	Экзопигмент (желтый)*
	Мицелиальная зона	Конициальная зона		
Без обработки	16,0 ± 2,9	10,7 ± 2,1	+	–
Вакуум	17,0 ± 2,9	11,0 ± 2,2	+	–
Плазма ВЧ разряда	19,0 ± 4,1	13,0 ± 3,3	++	++

\*Степень интенсивности: – полное отсутствие, + слабая, ++ сильная

После обработки ВЧ плазмой конидиальные головки *A. niger* имели более крупный размер и длину цепочки спор (до 350 мкм) по сравнению с контролем (210 мкм), что увеличивает риск негативного влияния контаминированной бумаги на здоровье людей. Оценка ростовой и кислотообразующей активности мицелия *A.niger*, подвергнувшегося обработке плазмой ВЧ разряда показала, что выделение органических кислот может значительно варьироваться. В некоторых случаях на среде с индикатором рН (бромкрезоловым пурпурным) ширина зоны индикации кислотообразования достигала 10–11 мм, превышая контрольные значения на 25–57 % (рис. 2). Эффективность обработки образцов плазмой барьерного разряда в течение 30 минут, оцененная исходя из количества КОЕ *A. niger*, оставшихся на бумаге, составила при расстоянии *l* до разрядной трубки 4 мм – 15–25 %, а при расстоянии 2 мм – 70–90 %. При малой длительности воздействия (3 мин) эффективность очистки поверхности образцов снижалась до 40–60 %. О высокой антифунгальной активности плазмы барьерного разряда при *l* = 2 мм также свидетельствовал тот факт, что после перенесения обработанной бумаги на питательную среду рост и вторичное спороношение *A. niger* наблюдались только вокруг образца и не присутствовали на поверхности самой бумаги, как в контроле и при *l* = 4 мм (рис. 3).

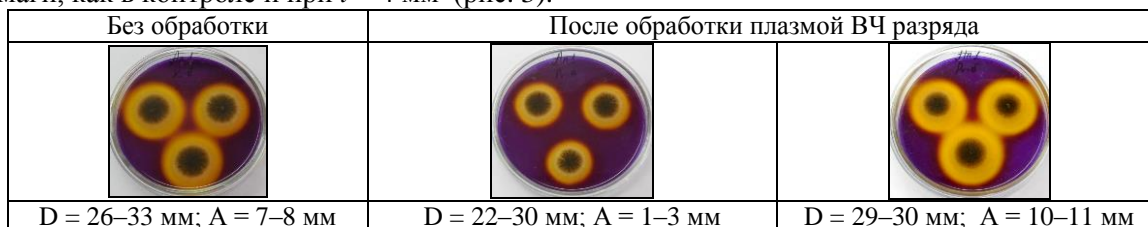


Рис. 2. Диаметр колоний (D) и зона ацидофикации (A) спустя 3 суток роста *A.niger* на питательной среде с бромкрезоловым пурпурным после 20 мин обработки низкотемпературной плазмой ВЧ разряда при низком давлении и без нее

Таким образом, обработка бумаги, колонизированной *A. niger*, плазмой СВЧ и ВЧ разрядов при низком давлении снижает количество КОЕ грибов, но также способствует ускорению роста, интенсификации спорообразования и продукции агрессивных органических кислот колониями, обладающих устойчивостью к воздействию плазмы. Установлено, что более значительным деконтаминационным эффектом в сочетании с высокой антифунгальной активностью обладает плазма барьерного разряда при атмосферном давлении.

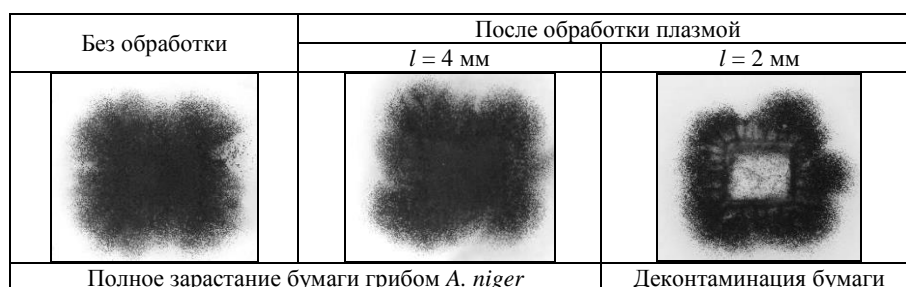


Рис. 3. Эффект деконтаминации бумаги от спор гриба *A. niger* при обработке плазмой барьерного разряда в течение 30 минут в зависимости от межэлектродного зазора *l*

Известно, что биоцидная активность холодной плазмы обусловлена воздействием на обрабатываемый материал химически активных частиц (ионов, возбужденных молекул, свободных радикалов) и УФ излучения. С целью анализа процессов, протекающих в плазме различных разрядов, и идентификации образующихся химических частиц исследованы спектродинамические и термодинамические параметры плазмы. В спектрах излучения плазмы ВЧ разряда в воздухе в области 250–1100 нм при давлении  $P = 200$  Па и удельной мощности  $W = 0,35$  Вт/см<sup>3</sup> регистрировали молекулярные полосы (1+) и (2+) систем молекулы N<sub>2</sub>, а также радикала OH (306 нм) (рис. 4, а). Спектры барьерного разряда были представлены только полосами (1+) и (2+) N<sub>2</sub> (рис. 4, б). Спектры излучения плазмы СВЧ разряда в воздухе при давлении 140 Па в диапазоне 250 – 1100 нм представлены молекулярными полосами (1+) и (2+) N<sub>2</sub>, полосами NO, CO, радикала OH, а также атомными линиями H<sub>α</sub>, H<sub>β</sub> и OI (рис. 4, в).

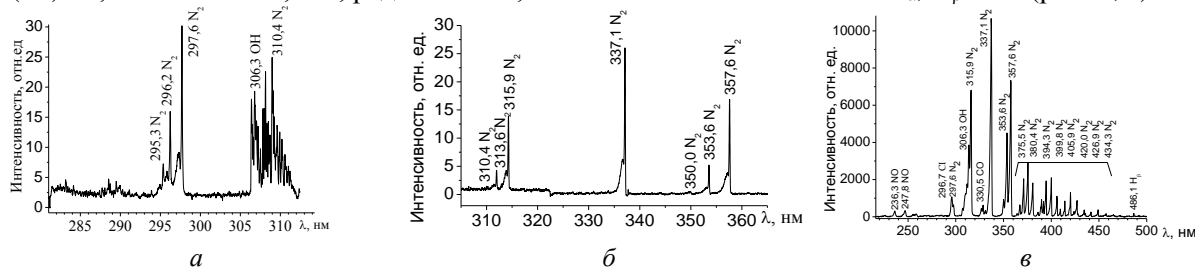


Рис. 4. Спектр излучения плазмы в воздухе: а – ВЧ разряда низкого давления, б – барьерного разряда атмосферного давления, в – СВЧ разряда низкого давления

Наличие в плазме радикалов OH – важнейшего фактора плазменной обработки, способствующего снижению количества жизнеспособных спор микроорганизмов, – является общим для ВЧ и СВЧ разрядов. Однако термодинамические условия в разрядах различаются, причем в плазме ВЧ разряда реализуются наиболее приемлемые для обработки термочувствительных материалов режимы. Существенного нагрева образцов также не наблюдалось при воздействии плазмы барьерного разряда. Это можно объяснить спецификой механизмов возбуждения и поддержания микроразрядов, в которых реализуется повышенная напряженность электрического поля (~ 10 кВ/см), что способствует наилучшей результативности обработки (температура плазмы составила 390 К). На поверхности (и по толщине) диэлектрических материалов с низкой теплопроводностью имеется некоторый градиент температуры, однако из-за кратковременного существования микроразрядов существенного локального перегрева материала не возникает.

### Заключение

Выполненные исследования выявили наибольшую эффективность использования барьерного разряда для плазменной очистки бумаги от спор плесневых грибов, что объясняется спецификой механизмов возбуждения и поддержания микроразрядов, в которых реализуются оптимальные условия для формирования высокой концентрации активных компонент, обеспечивающих эффективное (до 90 %) снижение количества спор медицински значимого вида *A. niger* при отсутствии термического воздействия на биополимерный материал.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке БРФФИ (грант № Т15МС-050) и ГПНИ «Конвергенция-2020» 2.4.02.

## THE EFFECT OF LOW-TEMPERATURE GAS DISCHARGE PLASMA ON FUNGI OF THE GENUS ASPERGILLUS COLONIZING PAPER

A.A. ARASHKOVA, I.A. GONTCHAROVA, V.A. LYUSHKEVICH, I.I. FILATOVA,  
N.I. CHUBRIK S.I. MADVEIKA, S.V. BORDUSAU

### Abstract

It was found that the exposure to low-temperature gas discharge plasma at atmospheric pressure is an effective way of paper cleaning from fungal spores. This effect is explained by the specific mechanisms of micro-discharges excitation and maintaining that ensure efficient (up to 90 %) reduction in the number of viable mould spores without local heating biopolymeric materials.

*Keywords:* molds, low-temperature plasma, high-frequency, super high-frequency and barrier discharges, optical emission spectroscopy.

### Список литературы

1. Белевич И.О., Александрова Г.А. // Вестник Пермского университета. 2007. Вып. 5, № 10. С. 151–154.
2. Кузикова И.Л., Медведева Н.Г., Сухаревич В.И. // Труды лаборатории консервации и реставрации документов СПФ АРАН. 2011. № 2. С. 237–245.
3. Марфенина О.Е., Фомичева Г.М. // Микология сегодня. 2007. Т.1. С. 235–266.
4. Morfill G.E. Nosocomial infections – a new approach towards preventive medicine using plasmas // New J. Phys. 2009. Vol. 11. № 11. P. 1–10.
5. Ioanid E.G. // Eur. Phys. J. Appl. Phys. 2012. № 58. P. 10803–10803.
6. Бондаренко П.Н., Емельянов О.А., Шемет М.В. // Журнал технической физики. 2014. Т. 84. № 6. С. 51–59.
7. Štítor M. Atmospheric-pressure diffuse coplanar surface discharge for surface treatments // Appl. Phys. Lett. 2002. Vol. 81. P. 2716.
8. Gontcharova I. // Proc of the 27th Symp. «Plasma Physics and Technology». 2016. Prague, Czech Republic, 2016. P. 81.
9. Spesair: software for calculating and fitting plasma spectra // SpectralFit S.A.S. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.spesair-radiation.net>. – Дата доступа: 4.10.2016.
10. Сазанова К.В. // Вестн. СПбГУ. Сер. 3. 2010. Вып. 3. С. 93–98.
11. Гордеева Т.Х., Гаврицкова Н.Н. // Вестник ПГТУ. 2012. № 2. С. 86–91.
12. Schilling J.S., Jellison J. // International Biodeterioration & Biodegradation. 2007. Vol. 60. P. 8–15.

612.178.4

## АНАЛИЗ РИТМОВ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММ С ПОМОЩЬЮ НЕЛИНЕЙНОГО ОПЕРАТОРА TEAGER-KAISER

А.О. КОЗМИДИАДИ, А.П. КЛЮЕВ

УП «Центр экспертиз и испытаний в здравоохранении»  
пер. Товарищеский 2а, Минск, 220037, Республика Беларусь

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 22 ноября 2016

Приведены результаты разработки и применения метода для решения прикладных задач анализа ритмической активности электроэнцефалограмм на основе с использованием нелинейного оператора.

*Ключевые слова:* электроэнцефалограмма, нелинейный оператор.