

УДК:539.141;537.868

БИОЦИДНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУЙ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ**А.А. Кириллов¹, А.В. Павлова¹, Е.А. Сафронов¹, Л.В. Симончик¹, Н.В. Дудчик²**¹Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, 220072, Беларусь, Минск, просп. Независимости 68,²Республиканский научно-практический центр гигиены, 220012, Беларусь, Минск, ул. Академическая 8,
E-mail: n_dudchik@tut.by, E-mail: a.kirillov@dragon.bas-net.by**Аннотация**

Исследован эффект осаждения на поверхности плотной агаровой среды плазменных струй на *золотистый стафилококк* He/O₂, Ar/O₂, N₂ и воздуха. Определено роль УФ излучение на дезактивацию бактерий. Эмиссия и инфракрасная абсорбция спектроскопии применяются для определения плотности плазмы биоцидных реактивных кислородных и азотных компонентов.

Ключевые слова: плазмообразующий газ, тлеющий разряд, биоцидные компоненты, плазменная обработка

Введение

В последнее время разработано множество источников неравновесной плазмы атмосферного давления для использования в плазменной медицине [1–3]. Особое внимание сосредоточено на разработке и применении плазменных струй, с помощью которых можно проводить обработку вне замкнутого разрядного объема объектов различных форм и размеров. Несмотря на обилие работ, в которых демонстрируются попытки использования плазменных источников в биомедицине, механизмы воздействия плазменных струй на микроорганизмы остаются недостаточно изученными.

В работе приводятся результаты исследования низкотемпературных плазменных струй тлеющего разряда атмосферного давления (ТРАД) на постоянном токе [4] в различных плазмообразующих газах и их использование для инактивации бактерий *Staphylococcus aureus*. Применяемые плазменные струи являются стационарными, что существенно облегчает установление взаимосвязей между инактивационной способностью струй и параметрами их плазмы.

Описание установки

Разрядное устройство (рис. 1) представляет собой кварцевую цилиндрическую разрядную камеру с внутренним диаметром 8 мм, внутри которой соосно расположены закруг-

ленный катод (диаметром 6 мм) и плоский анод толщиной 4 мм из нержавеющей стали, между которыми зажигался нормальный ТРАД на постоянном токе.

Межэлектродный промежуток равен 1 мм, рабочее значение тока разряда – 30 мА. Расход рабочего газа составлял 3 – 10 л/мин. Генерируемая в ТРАД плазма выносится вместе с потоком газа через центральное отверстие в аноде диаметром 1,5 мм в окружающий воздух на расстояние до нескольких сантиметров (видимое свечение плазмы), при этом диаметр струи составляет 2–3 мм.

Разряд поддерживался нестабилизированным источником питания постоянного тока с выходным напряжением до 1,5 кВ с балластным резистором около 10 кОм.

Плазменные струи ТРАД, истекающие в воздух, были получены для различных плазмообразующих газов и смесей, таких как 95%He–5%O₂, 95%Ar–5%O₂, N₂ и воздух.

Плазменная обработка микроорганизмов

Бактерицидная эффективность разработанных плазменных струй исследовалась на грамположительных бактериях *Staphylococcus aureus*. Суспензия микроорганизмов с исходной концентрацией 10⁷ КОЕ/мл помещались на поверхность недифференцированной плотной питательной среды в чашках Петри.

После приготовления образцов центральная зона каждого из 4-х секторов 90-миллиметровой чашки Петри обрабатывалась

плазменной струей ТРАД с различным време-

нем экспозиции.

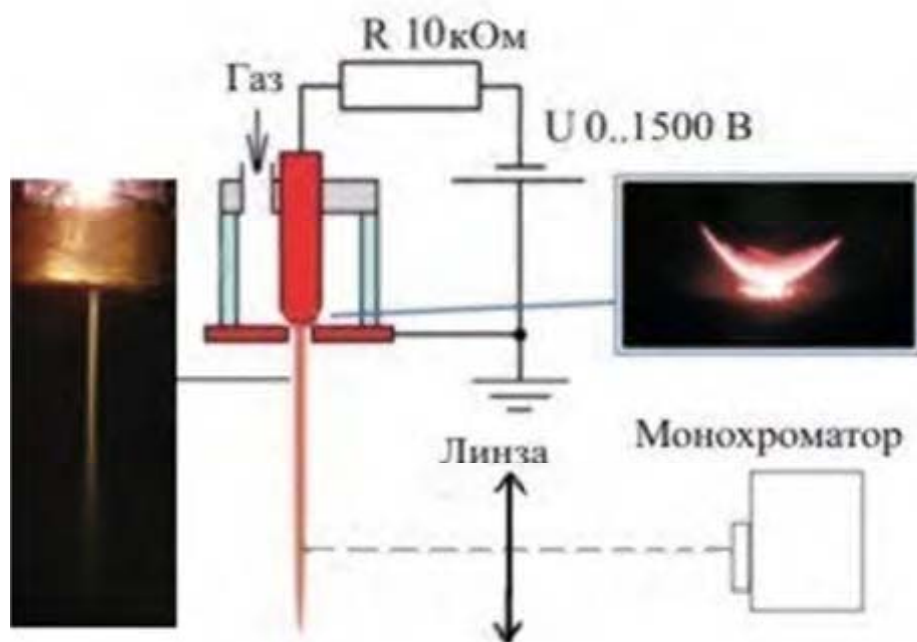


Рис. 1. Схема устройства генерации и наблюдения плазменных струй.

В разряде газовая температура достигает значений порядка 2000 °С, однако на выходе из отверстия в аноде происходит интенсивное перемешивание плазмы струи с окружающим воздухом, что приводит к быстрому ее охлаждению.

Первоначально с ростом расхода плазмообразующего газа наблюдается удлинение струи при незначительном изменении диаметра.

При расходе газа 5 л/мин происходит резкое увеличение диаметра струи и убывание ее температуры, что обусловлено переходом от ламинарного потока газа к турбулентному.

Температура струи в точке воздействия на бактерии контролировалась с помощью хромель-алюмелевой термопары и на выбранном расстоянии 4 см между анодом и поверхностью агар не превышала 45 °С, что исключало термическое повреждение микроорганизмов.

Определение инактивационной способности плазмы производилось методом счета колоний.

Для этого после плазменной обработки пластины агара культивировались в течении 18 часов при температуре 37 °С.

Количество выросших макроколоний давало число выживших микроорганизмов на образце.

Результаты обработки *S. aureus* в течении 10 мин плазменными струями, полученными в различных плазмообразующих газовых смесях, представлены на рис. 2.

В случае струй Ag/O₂ и He/O₂ бактерицидный эффект приблизительно одинаков. Этот эффект существенно слабее при обработке азотной струей. Наилучший инактивационный эффект наблюдался для воздушной струи. Следует отметить, что, несмотря на малый диаметр струи, инактивация происходит по всей площади секторов для всех газовых смесей.

Механизмы воздействия плазменных струй на микроорганизмы

Помимо не существенного в нашем случае термического воздействия, к возможным механизмам воздействия плазменных струй на микроорганизмы относятся ультрафиолетовое излучение и химически активные частицы, такие как NO, O₃, OH и др.

Эмиссионные спектры излучения струй регистрировались с использованием дифракционного монохроматора МДД 500x2.

Изображение части струи, расположенной на 1 см ниже края анода, фокусировалось (1:1) в плоскости входной щели монохроматора высотой 1 см, которая располагалась параллельно струе.

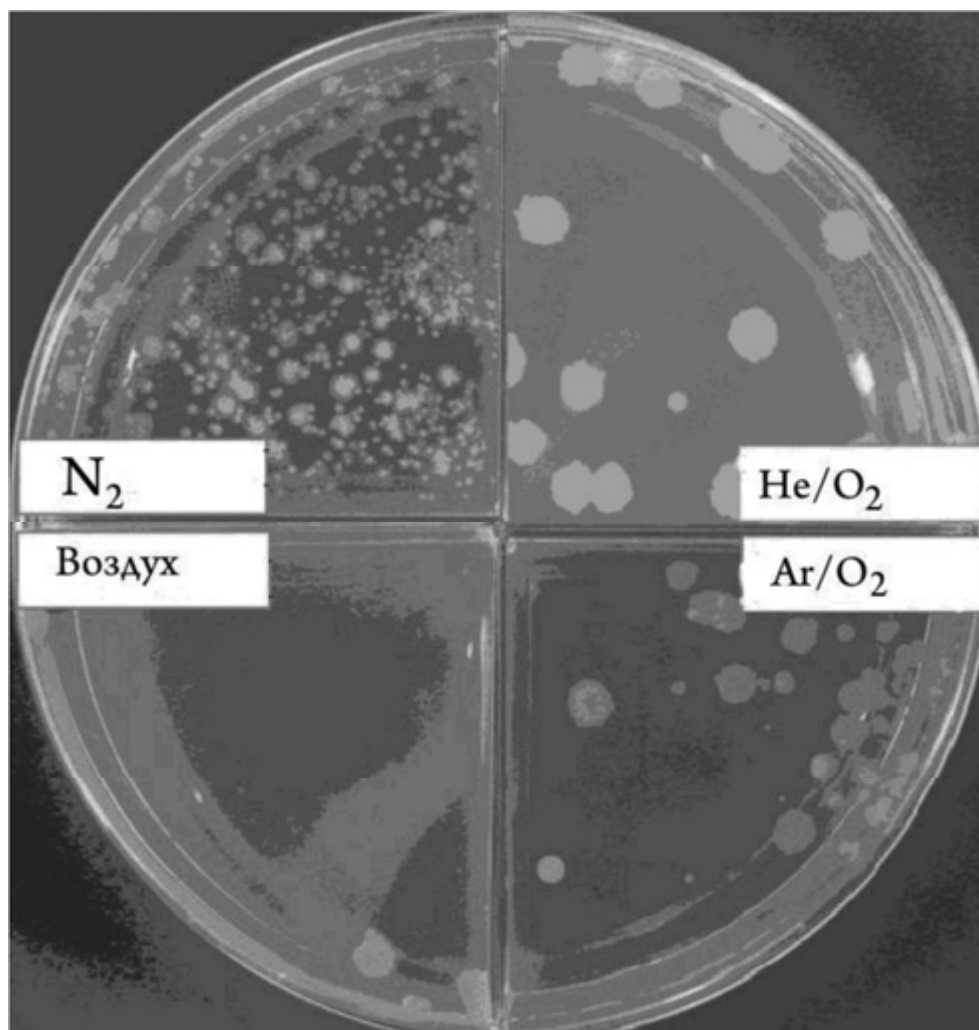


Рис. 2. Результаты инактивации *S. Aureus* плазменными струями N₂, Ar/O₂, He/O₂ и воздуха после 10 мин обработки.

В бактерицидном диапазоне 200–300 нм в спектрах азотной и воздушной струй наблюдалось излучение, обусловленное полосами NO (рис. 3 в,г). В спектрах излучения всех струй, за исключением азотной, присутствует интенсивная полоса OH(A–X).

В спектре азотной струи преобладают интенсивные полосы NO, CN, NH в ультрафиолетовой части спектра. Напротив, спектр воздушной струи (рис. 3г) в основном сосредоточен в диапазоне свыше 400 нм, где наблюдается активное свечение NO₂, обусловленное хемилумinesцентной реакцией $\text{NO} + \text{O} + \text{M} \rightarrow \text{NO}_2 + \text{M} + h\nu$ [5].

Для выяснения значимости УФ излучения в инактивации микроорганизмов плазменными струями были проведены эксперименты, в которых между чашками Петри и анодом (на расстоянии 0,5 см от чашки Петри) помещались пло-

скопараллельные пластины из LiF, CaF₂ и кварцевого стекла, пропускающие УФ излучение ТРАД в бактерицидном диапазоне 200–315 нм, исходящее из отверстия в аноде и плазменных струй, но ограждающие микроорганизмы от газовых потоков. Одинаковое число выросших колоний микроорганизмов в не подвергшихся обработке чашках Петри и в чашках Петри, защищенных пластинами, позволяет сделать вывод о незначительной роли УФ излучения при инактивации микроорганизмов плазменными струями.

Для определения концентраций газовых компонент плазменных струй методом абсорбционной ИК спектроскопии использовался ИК Фурье-спектрометр Nexus (Thermo-Nicolet) и газовая кювета 186-0305 фирмы Perkin-Elmer с окнами из германия.

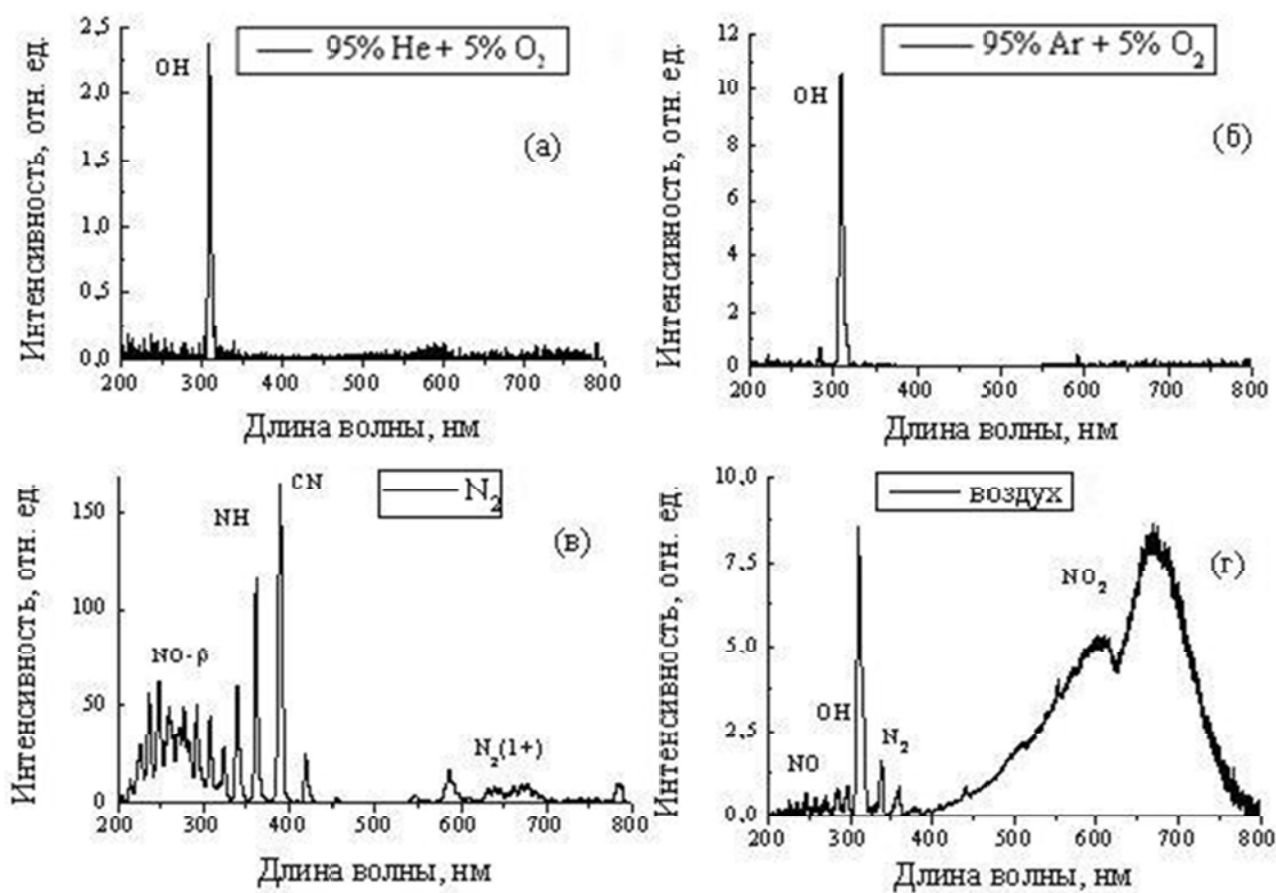


Рис. 3. Спектры излучения He/O₂ (а), Ar/O₂ (б), азотной и воздушной (г) плазменных струй.

ИК спектры регистрировались в спектральном диапазоне 600–4000 см⁻¹ с разрешением 2 см⁻¹. Оптический путь газовой кюветы составлял 135 см.

Была выбрана треугольная функция аподизации, приводящая к дифракционной аппаратной функции, что позволило определить мольные доли бактерицидных компонент струй, сопоставляя экспериментальные и расчетные спектры поглощения. Вычисление спектров поглощения осуществлялось с использованием базы спектральных данных Nitran [6]. Забор газа в кювету проводился с помощью трубки диаметром 3,5 мм, которая помещалась на ось струи параллельно газовому потоку.

В спектрах поглощения всех струй наблюдаются колебательно-вращательные полосы H₂O и CO₂. Эти газовые компоненты либо присутствуют в плазмообразующем газе (воздух), либо подмешиваются в струю (He/O₂, Ar/O₂ и N₂) из окружающего воздуха. Поскольку интерес представляют компоненты струй, воздействие которых приводит к гибели микроорганизмов, то из спектров поглощения полосы H₂O и CO₂ удалялись путем вычитания.

В спектрах поглощения струй He/O₂ и Ar/O₂ (рис. 4 а,б) имеется колебательно-вращательная полоса озона (1000–1080 см⁻¹). В струе He/O₂ мольная доля O₃ вблизи отверстия в аноде составляет 150 ppm и, немного увеличивается при удалении от анода, затем спадает на расстоянии 4 см до 80 ppm, при этом содержание озона в струе Ar/O₂ в 1,3 раза ниже. В спектре воздушной струи присутствуют полосы оксида азота, диоксида азота, оксида диоксида азота и азотистой кислоты (рис. 4г).

Мольные доли NO, NO₂, N₂O и HNO₂ монотонно убывают от 400 ppm, 350 ppm, 6 ppm и 100 ppm вблизи анода до 40 ppm, 20 ppm, 1 ppm и 10 ppm на расстоянии 4 см. Концентрация NO₂ в азотной струе ниже, чем в воздушной более чем на порядок величины. Концентрация N₂O в азотной струе монотонно убывает и ниже, чем в воздушной в несколько раз.

Вследствие высоких констант скоростей реакций гидроксила OH с присутствующими в струях продуктами плазмохимических реакций [7] концентрация OH резко убывает, как только прекращается его образование, и на расстоянии 4 см от отверстия в аноде OH практически отсутствует.

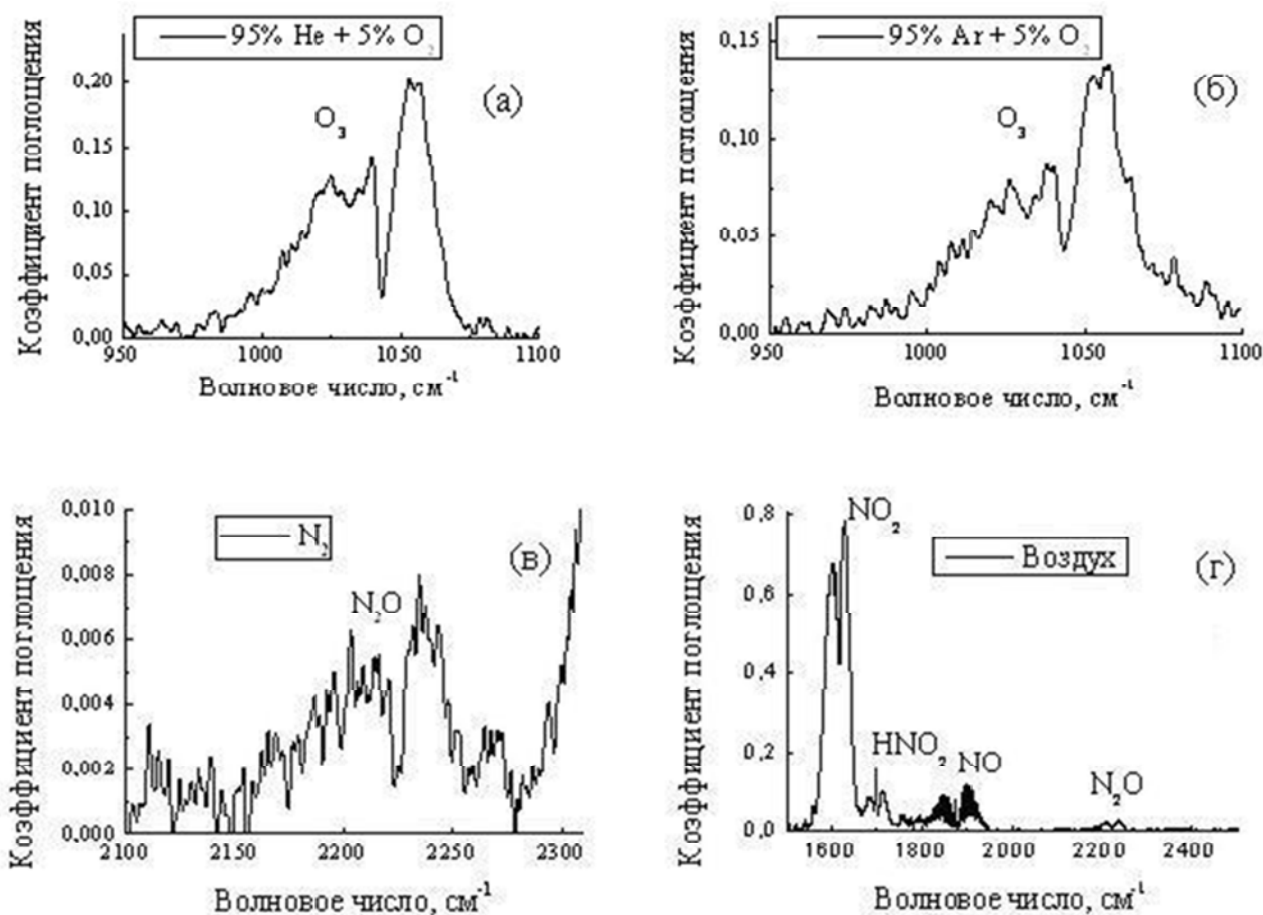


Рис. 4. Спектры поглощения газовых компонент He/O₂ (а), Ar/O₂ (б), азотной (в) и воздушной (г) плазменных струй за вычетом H₂O и CO₂ вблизи анода

Выводы

Таким образом, основным фактором инактивационного действия исследуемых плазменных струй на бактерии *Staphylococcus aureus* являются химически активные молекулярные газовые компоненты.

В He/O₂ и Ar/O₂ струях это озон, мольные доли которого на расстоянии 4 см от анода, где размещаются образцы с микроорганизмами, составляют, соответственно, 80 ppm и 60 ppm, а в воздушной струе – оксид азота, диоксид азота и азотистая кислота с мольными долями 40 ppm, 20 ppm и 10 ppm.

Концентрация бактерицидных компонент в азотной струе ниже, чем в воздушной более чем на порядок величины.

Литература

1. Fridman A., Friedman G. Plasma Medicine. Ew New York: Wiley, 2013.
2. Lu X., Laroussi M., Puech V. // Plasma Sources Sci. Technol. 2012. V. 21 No.3. 034005.
3. Кириллов А.А., Павлова А.В., Сафронov Е.А., Симончик Л.В., Дудчик Н.В. // Прикладная физика. 2013. № 5. С. 52.
4. Arkhipenko V.I., Kirillov A.A., Safronau Ya.A., Simonchik L.V. // Eur. Phys. J. D. 2010. V. 60. P. 455.
5. Becker K.H., Groth W., Thran D. // Chem. Phys. Letters. 1972. V. 15. No. 2. P. 215.
6. <http://www.cfa.harvard.edu/HITRAN/>
7. Atkinson R., Baulch D.L., Cox R. A., Crowley J. N., Hampson R.F., Hynes R.G., Jenkin M.E., Rossi M. J., Troe J. // Atmos. Chem. Phys. 2004. V. 4. No. 6. P. 1461

BIOCIDAL COMPONENTS OF DC GLOW DISCHARGE PLASMA JET

A.A. Kirillov¹, A.V. Paulava¹, Y.A. Safronau¹, L.V. Simonchik¹, N.V. Dudchik²

¹B.I. Stepanov Institute of Physics NAS Belarus, 220072, Belarus, Minsk, Independence av., 68,

²Republican Scientific and Practical Centre of Hygiene, 220012, Belarus, Minsk, st. Academic 8,

E-mail: n_dudchik@tut.by, E-mail: a.kirillov@dragon.bas-net.by

Abstract

The effect of He/O₂, Ar/O₂, N₂ and air plasma jets on Staphylococcus aureus deposited on the surface of dense agar medium is investigated. The role UV radiation in bacteria inactivation is determined. Emission and infrared absorption spectroscopy are applied to determine densities of plasma biocidal reactive oxygen and nitrogen components.

Keywords: plasma gas, glow discharge, biocidal components, plasma treatment

ТҰРАҚТЫ ТОКТАҒЫ ЖИДЕ РАЗРЯДЫНЫҢ ПЛАЗМАЛЫҚ АҒЫННЫҢ БИОЦИДТІ КОМПОНЕНТТЕРІ

А.А. Кириллов¹, А.В. Павлова¹, Е.А. Сафронов¹, Л.В. Симончик¹, Н.В. Дудчик²

¹Б.И. Степанов атындағы физика Институты Беларусь Ұлттық ғылым академиясы

²Республикалық ғылыми-практикалық гигиена орталығы, 220012, Беларусь, Минск қ. Академиялық к., 8

Электрондық пошта: n_dudchik@tut.by

Аннотация

He/O₂, Ar/O₂, N₂ и ауаның алтын Стафилакоккқа плазма ағының тығыз тұқыл ортаның беттік қабатына отырғызу эффектісі зерттелінді. Бактерияның дезактивациясына УК сәулелену ролі анықталды. Азотты және оттекті бицидті реактивті компоненттерін плазма тығыздығын анықтау үшін эмиссия және инфрақызыл абсорбция спектроскопиясын қолданады.

Түйінді сөздер: плазма газ, разрядты, бицидными компоненттері, плазмалық емдеу