

УДК 533.924

**ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЫ С ЖИВЫМИ  
ТКАНЯМИ**

А.Н. Алейник, А.Н. Байков\*, Г.Ц. Дамбаев\*,  
О.И. Денек, О.С. Жданова\*, Е.П. Красноженов\*,  
Е.В. Семичев\*

Томский политехнический университет  
\*Сибирский государственный медицинский  
университет, г. Томск  
E-mail: aleinikan@mail.ru

Показаны основные механизмы взаимодействия неравновесной плазмы с живыми тканями. Проведены исследования разработанного источника неравновесной плазмы. Подтверждена высокая эффективность стерилизации микроорганизмов.

**Ключевые слова:**

Неравновесная плазма, стерилизация, плазмохимические реакции.

Все виды плазмы можно представить в виде двух разновидностей: равновесная и неравновесная. Температура плазмы определяется средней энергией составляющих ее частиц. Различные виды плазмы существуют вне термодинамического равновесия и характеризуются температурой составляющих ее частиц и наличием различных степеней свободы. Температура электронов значительно превышает температуру тяжелых частиц. Ионизационные и химические процессы в такой неравновесной плазме определяются температурой электронов и слабо чувствительны к температуре газа. Неравновесная плазма такого вида называется нетепловой. Равновесная плазма связана с большим выделением тепла и при высоких давлениях способна выделять большую мощность. Однако она обладает низкой избирательностью возбуждения и высокой температурой газа, что ограничивает ее применение. С другой стороны, нетепловая плазма обладает высокой избирательностью и эффективностью в плазмохимических реакциях. До сих пор исследования неравновесной плазмы были связаны с удалением летучих органических веществ, контролем загрязнений, обработкой поверхностей полимеров, генерацией озона и так далее [1, 2].

Неравновесная плазма получается с помощью различных видов электрических разрядов или электронных пучков. В этом случае основная часть электрической энергии идет на производство энергетических электронов, а не на нагрев потока газа. Взаимодействие

этих электронов с рабочим газом и поверхностью электродов приводит к рождению возбуж-

**Алейник Александр Николаевич**, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. кафедры прикладной физики Физико-технического института ТПУ.  
E-mail: aleinikan@mail.ru

Область научных интересов: медицинская физика, онкология.  
**Байков Александр Николаевич**, д-р мед. наук, профессор, заведующий Центральной научно-исследовательской лабораторией ГОУ ВПО Сибирского государственного медицинского университета Росздрава.  
E-mail: baikov47@mail.ru

Область научных интересов: физиология сердца, сосудов, общая физиология человека, трансплантология, имплантология сердца и сосудов, экологическая безопасность жизнедеятельности.

**Дамбаев Георгий Цыренович**, д-р мед. наук, профессор, член-корр. РАМН, заведующий кафедрой госпитальной хирургии ГОУ ВПО Сибирского государственного медицинского университета Росздрава.  
E-mail: lescnil@yandex.ru

Область научных интересов: реконструктивная хирургия пищевода, желудка, кишечника при опухолевой патологии, трансплантация печени и почек с использованием полубиологических сосудистых протезов.

**Денек Оксана Игоревна**, инженер каф. прикладной физики Физико-технического института ТПУ.  
E-mail: o.deneko@yandex.ru

Область научных интересов: медицинская физика, приборы и методы экспериментальной физики.

**Жданова Оксана Сергеевна**, канд. мед. наук, ст. преподаватель кафедры микробиологии и вирусологии ГОУ ВПО Сибирского государственного медицинского университета Росздрава.

E-mail: oksfox@pochta.ru

Область научных интересов: микробиология, вирусология, биоупаковки.

**Красноженов Евгений Павлович**, д-р мед. наук, профессор, заведующий кафедрой микробиологии и вирусологии ГОУ ВПО Сибирского государственного медицинского университета Росздрава.

E-mail: krasnoj@mail.ru

Область научных интересов: микробиология, инфекция, иммунология.

**Семичев Евгений Васильевич**, канд. мед. наук, научный сотрудник Центральной научно-исследовательской лаборатории ГОУ ВПО Сибирского государственного медицинского университета Росздрава; E-mail: evsemichev@yandex.ru  
Область научных интересов: экспериментальное моделирование, ургентная хирургия паренхиматозных органов, методы коагуляции, эндоскопическая диагностика, эндоскопическая коагуляция.

денных состояний атомов и молекул, свободных радикалов, ионов и дополнительных электронов за счет ионизации. Возбужденные частицы и активные радикалы окисляют, восстанавливают или разлагают молекулы вредных компонентов. В отличие от неравновесной плазмы основным механизмом взаимодействия в равновесной плазме является тепловое сжигание, что требует высокой температуры рабочего газа. Для надежного применения неравновесной плазмы в технологических процессах необходимо понимание основных принципов разряда, для того чтобы управлять параметрами плазмы. Особый интерес представляет применение неравновесной плазмы в медицине. Последние исследования показали, что такая плазма эффективно инактивирует микроорганизмы на живых тканях, ускоряет сворачиваемость крови, увеличивает пролиферацию клеток и заживление ран [3].

На кафедре прикладной физики Физико-технического института ТПУ разработан источник неравновесной плазмы для применения в медицинских целях. На рис. 1 показан внешний вид разряда при воздействии на живые ткани. Мощность, измеренная электрическим методом примерно  $0,7 \text{ Вт/см}^2$ . Температура в месте воздействия не превышает 45 градусов.

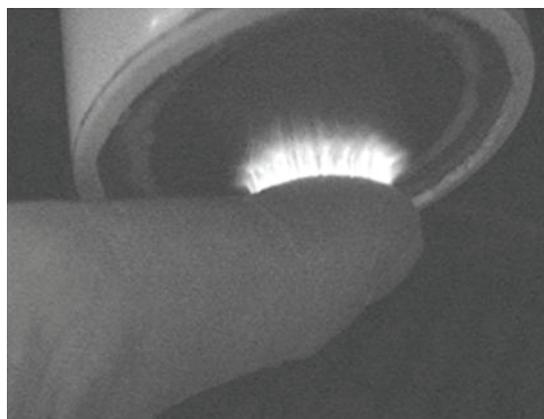


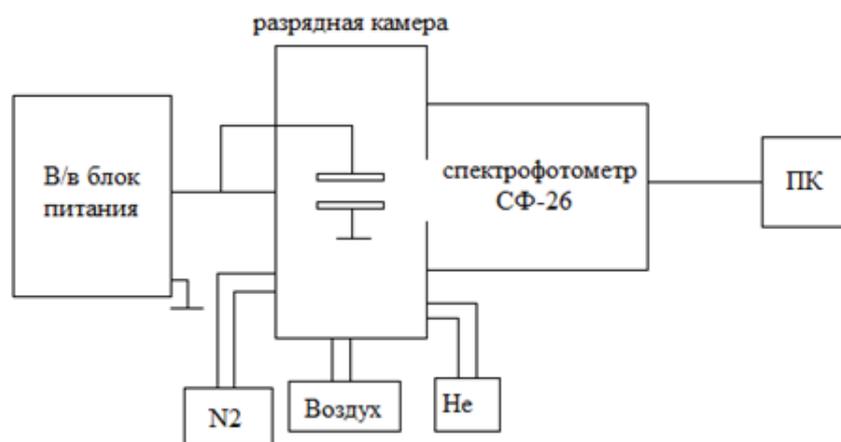
Рис. 1. Внешний вид плазменного разряда

Плазма представляет собой ионизированный газ. Основными компонентами плазмы являются положительные ионы, отрицательные ионы, электроны, нейтральные атомы, свободные радикалы, фотоны, атомы в метастабильных состояниях. Таким образом, плазма объединяет частицы и излучение различных видов и представляет эффективный источник для химических реакций, которые невозможны в других состояниях вещества. Химические реакции, происходящие в плазме, имеют довольно сложный характер и включают большое количество элементарных реакций. Основные типы реакций можно разделить на гомогенные и гетерогенные. Гомогенные реакции происходят между частицами в газовой фазе в результате неупругих столкновений между электронами и тяжелыми частицами или между тяжелыми частицами. Гетерогенные реакции в свою очередь встречаются между частицами плазмы и поверхностью твердого тела, находящегося в контакте с плазмой. Основные виды плазмохимических реакций показаны в таблице.

**Таблица.** Основные виды взаимодействий в плазме

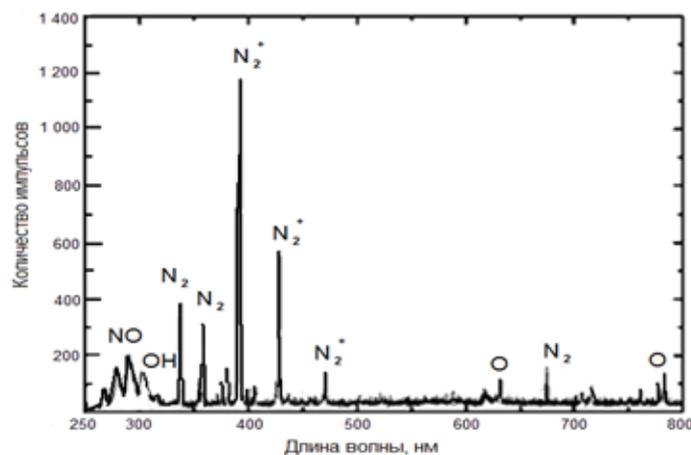
Возбуждение атомов и молекул	$e + A_2 \rightarrow A_2^* + e$ $e + A \rightarrow A^* + e$	Приводит к появлению возбужденных состояний атомов и молекул при взаимодействии с электронами
Снятие возбуждения	$e + A_2^* \rightarrow A_2 + e + h\nu$	Возбужденные состояния возвращаются в основное состояние, излучая фотоны
Ионизация	$e + A_2 \rightarrow A_2^+ + e$	Электроны ионизируют частицы, образуя положительные ионы
Диссоциация	$e + A_2 \rightarrow 2A + e$	Неупругое взаимодействие электронов с молекулой вызывает ее диссоциацию без образования ионов
Объемная рекомбинация	$e + A + B \rightarrow A + B$	Потеря плазмой заряженных частиц за счет рекомбинации противоположных зарядов
Диссоциация Пеннинга	$M^* + A_2 \rightarrow 2A + M$	Взаимодействие метастабильных частиц с нейтральными приводит к ионизации или диссоциации
Ионизация Пеннинга	$M^* + A \rightarrow A^+ + M + e$	
Обмен зарядом	$A^+ + B \rightarrow B^+ + A$	Передача заряда от иона нейтральной частице
Рекомбинация ионов	$A^+ + B^+ \rightarrow AB$	Два сталкивающихся иона рекомбинируют, образуя молекулу
Электрон-ионная рекомбинация	$e + A_2^+ + M \rightarrow A_2 + M$	Заряженные частицы теряются плазмой за счет рекомбинации противоположных зарядов
Ион-ионная рекомбинация	$A^+ + B^+ + M \rightarrow AB + M$	Происходит за счет взаимодействия трех тел

Для исследования частиц, входящих в состав барьерного разряда, использовался метод эмиссионной спектроскопии. В этом случае химические вещества идентифицируются с помощью определенных линий излучения в спектре, которые соответствуют характерным переходам электронов атома или молекулы. В случае барьерного разряда электроны ионизируют нейтральные частицы, переводят их в метастабильные состояния, испытывают другие неупругие процессы. Схема эксперимента показана на рис. 2.

**Рис. 2.** Схема эксперимента

Излучение разряда регистрируется спектрофотометром марки СФ-26 ЛОМО, затем поступает через параллельный порт на компьютер, где происходит обработка информации.

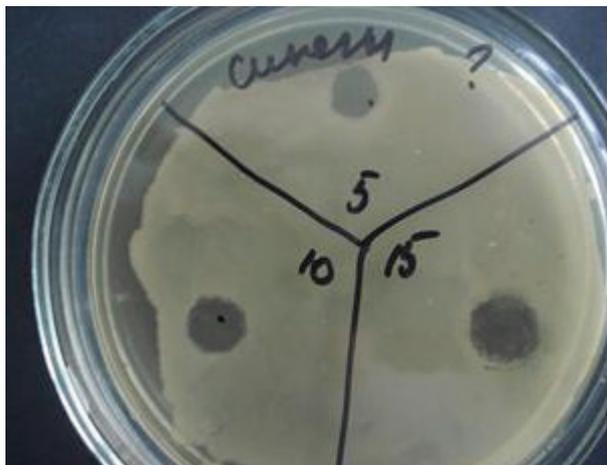
В качестве рабочего газа использовался воздух. На рис. 3. показан спектр излучения барьерного разряда в воздухе.



**Рис. 3.** Спектр излучения барьерного разряда в воздухе

Исследование антимикробных свойств разработанного прибора проводилось на кафедре микробиологии и вирусологии Сибирского государственного медицинского университета.

Из суточных культур микроорганизмов были приготовлены разведения на физиологическом растворе в концентрации 108 КОЕ/мл и засеяны на мясопептонный агар в объеме 0,1 мл. Инактивация проводилась в воздушной среде при атмосферном давлении и температуре 24 °С. Время обработки составляло 5, 10 и 15 сек. Результат воздействия нетепловой плазмы на микроорганизмы *Kl.pneumoniae* спустя 24 часа после обработки показан на рис. 4.



**Рис. 4.** Вид поверхности агара, засеянного микроорганизмами *Kl.pneumoniae*, спустя 24 ч после обработки неравновесной плазмой

В чашке Петри, где исследовалось влияние холодной плазмы на инактивацию микроорганизмов *Kl.pneumoniae* была выявлена следующая закономерность, а именно после 5 сек обработки диаметр инактивированной поверхности составил 10 мм при диаметре рабочего электрода 5 мм. В дальнейшем отмечалось увеличение диаметра инактивированной поверхности до 18 мм с увеличением времени обработки до 15 сек.

В группе с обработкой посева *E.coli* также наблюдалась отрицательная динамика роста бактерий, однако, по сравнению с предыдущей, динамика была менее выражена (9, 13, 14 мм соответственно).

При обработке агара засеянного *P.vulgaris* было установлено полное уничтожение микроорганизмов в обработанной поверхности и рост диаметра инактивированной поверхности до 13 мм.

Имеется несколько факторов, оказывающих влияние на инактивацию бактерий плазмой, а именно, тепло, ультрафиолетовое излучение, озон и заряженные частицы [4–6].

Для проверки влияния УФ-излучения на инактивацию бактерий культуры были закрыты стеклом, пропускающим УФ. При этом остальные реактивные и заряженные частицы не достигали обрабатываемой поверхности. В результате стерилизующая способность плазмы резко снизилась, что свидетельствует о том, что УФ-излучение не вносит существенный вклад в инактивацию. Стерилизация осуществляется в основном заряженными и активными частицами плазмы.

Кислород играет важную роль в процессах метаболизма и излечения ран. В случае повреждения тканей происходит разрыв кровеносных сосудов, что приводит к увеличенному потреблению кислорода окружающими тканями [7–9]. Это приводит к диффузии кислорода от окружающих тканей в поврежденную область. Кроме того, кислород активно используется для создания реактивных окислительных частиц, таких как перекись водорода ( $H_2O_2$ ), и супероксид, которые создаются фагоцитами. Их цель – разрушение бактерий. Реактивные компоненты, содержащиеся в плазме, могут усиливать функции кислорода на ранней стадии излечения, за счет генерации в области раны  $H_2O_2$  и  $O_2^-$ . В этом случае организм не тратит энергию на их создание, что приводит к повышению уровня кислорода в месте раны и более эффективному его использованию в процессах метаболизма и излечения. Область применения неравновесной плазмы в медицине будет постоянно расширяться. Поэтому необходимы интенсивные исследования, направленные на понимание процессов взаимодействия плазмы с тканями на клеточном уровне.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chirokov A., Gutsol A., Fridman A. Atmospheric pressure plasma of dielectric barrier discharges // *Pure and Applied Chemistry*. – 2006. – V. 77 (2). – P. 487–495.
2. Eliasson B., Kogelschatz U. Nonequilibrium volume plasma chemical processing // *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 1991. – V. 19 (6). – P. 1063–77.
3. Fridman G., Friedman G., Gutsol A., Shekhter A.B., Vasilets V.N., Fridman A. Applied Plasma Medicine // *Plasma Process. and Polym.* – 2008. – V. 5. – Iss. 6. – P. 503–533.
4. Stoffels E. «Tissue Processing» with Atmospheric Plasmas // *Contrib. Plasma Phys.* – 2007. – V. 47. – № 1, 2. – P. 40–48.
5. Gaunt L.F., Beggs C.B., Georghiou G.E. Bactericidal Action of the Reactive Species Produced by Gas-Discharge Nonthermal Plasma at Atmospheric Pressure // *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 2006. – V. 34. – № 4. – P. 785–801.
6. Lerouge S., Fozza A.C., Wertheimer M.R., Marchand R., Yahia L.H. Sterilization by Low-Pressure Plasma: The Role of Vacuum-Ultraviolet Radiation // *Plasmas and Polymers*. – 2000. – V. 5. – № 1. – P. 730–736.
7. Rodriguez P.G., Felix F.N., Woodley D.T., Shim E.K. The role of oxygen in wound healing: a review of the literature // *Dermatol Surg.* – 2008. – V. 34. – P. 1159–1163.
8. Tandara A.A., Mustoe T.A. Oxygen in wound healing – more than a nutrient // *World J. Surg.* – 2004. – V. 28. – P. 294–301.
9. Whitney J.D. Physiological effects of tissue oxygenation on wound healing // *Heart Lung*. – 1989. – V. 18. – P. 466–470.

Поступила 21.02.2012 г.