

УДК 537.523

## ФАКТОРЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ ГЕНЕРИРУЕМОЙ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ

Ю.В. ЗАПОРОЖЧЕНКО, Д.А. КОТОВ, Е.К. ЖЕЛЕЗНОВА, А.Н. ОСИПОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (Минск, Беларусь)*

**Аннотация.** Проведенные аналитические исследования позволили установить основные и второстепенные факторы воздействия плазмы диэлектрического барьерного разряда генерируемой при атмосферном давлении на биологические объекты. Исследования показали, что основными факторами являются – генерируемые активные формы кислорода, влияние на уровень кислотности за счет концентрации кислотообразующих радикалов и заряженных частиц, нагрев биологического материала, электромагнитное поле радиочастотного диапазона, УФ-излучение, а также заряженные частицы (электроны плазмы, ионы, радикалы, атомы и молекулы в возбужденных состояниях) и их концентрации.

**Ключевые слова:** плазма диэлектрического барьерного разряда, воздействие плазмы на биообъект, активные формы кислорода, ЭМ поле, излучение в оптическом диапазоне, заряженные и возбужденные частицы.

## IMPACT FACTORS OF LOW-TEMPERATURE PLASMA GENERATED AT ATMOSPHERIC PRESSURE ON BIOLOGICAL OBJECTS

YLIYA V. ZAPAROSZHCHANKA, EKATERINA K. ZHELEZNOVA, DMITRY A. KOTOV,  
ANATOLY N. OSIPOV

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

**Abstract.** The conducted analytical research made it possible to establish the main and secondary factors of the impact of the dielectric barrier discharge plasma generated at atmospheric pressure on biological objects. Research have shown that the main factors are generated reactive oxygen species, the effect on the level of acidity due to the concentration of acid-forming radicals and charged particles, the heating of biological material, the electromagnetic field of the radio frequency range, UV radiation, as well as charged particles (plasma electrons, ions, radicals, atoms and molecules in excited states) and their concentrations.

**Keywords:** dielectric barrier discharge plasma, plasma effect on a biological object, reactive oxygen species, electromagnetic field, optical emission, charged and excited particles.

### Введение

Преимуществами плазменных методов обработки являются возможность воздействия на объекты, особенно чувствительных к нагреву, в контролируемой активной среде, где отсутствует образование побочных химических соединений, опасных для окружающей среды, здоровья человека, а также существенно снижает время процесса. Чрезвычайно важным является и то, что после плазменной обработки поверхность как биообъектов, так и биомедицинских материалов не теряет своих биоактивных свойств. Это возможно благодаря слабо ионизационному характеру разряда холодной плазмы при атмосферном давлении. Противомикробная эффективность плазмы связана с конкретными параметрами используемой разрядной системы и ее рабочими характеристиками, такими как: уровень мощности, используемый для генерации плазмы, газовая смесь в разрядном промежутке, интенсивность и продолжительность воздействия, конструкция системы генерации плазмы, скорость потока и давление.

## Методика проведения эксперимента

Степень ионизации в диэлектрическом барьерном разряде меньше  $10^{-4}\%$ , а концентрация заряженных частиц (электронов, положительных и отрицательных ионов), достаточная для обеспечения квазинейтральности и поддерживается за счет атомов и молекул газов, ускоряемых во внешнем электрическом поле. «Холодная» атмосферная плазма может быть получена путем ограничения количества высокоэнергетических электронов с использованием короткого времени воздействия (-100 нс) за цикл. В процессе генерации холодной плазмы образуется ряд составляющих: нейтральный газ, заряженные частицы, возбужденные атомы и молекулы, химически активные молекулы (NO, O<sub>3</sub>, OH, O<sub>2</sub><sup>-</sup>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), электрическое поле, излучение в оптическом диапазоне, ультрафиолетовое излучение. Из всех возможных факторов, возникающих при генерации плазмы, в метаболизме биологических объектов в основном участвуют долгоживущие радикалы и оксид азота. Помимо неустойчивых атомов, не меньшее биологическое значение имеет и оксид азота (NO). Он является важной регуляторной внутри и межклеточной сигнальной молекулой. Механизм действия холодной плазмы реализуется как за счет совместного взаимодействия (эффект потенцирования) метастабильных молекул, так и действия электрического поля и излучения в оптическом диапазоне.

На основе анализа различных разрядных систем установлено, что наиболее перспективной для исследований является система, использующая плазму диэлектрического барьерного разряда, так как при диэлектрическом барьерном разряде количество частиц с низкой энергией больше и, таким образом, при данном разряде образовывается нетермическая плазма. Такой разряд возникает исключительно при импульсном напряжении питания в электродной системе, где один или оба электрода покрыты слоем диэлектрика. Возникший диффузный разряд при атмосферном давлении создает диффузную, нетермическую неравновесную плазму по всему объему межэлектродного промежутка [1].

На биологический объект (клетку) помещенный в плазму, как показано на рисунке, оказывают комбинированное воздействие ряд таких основных факторов, как:

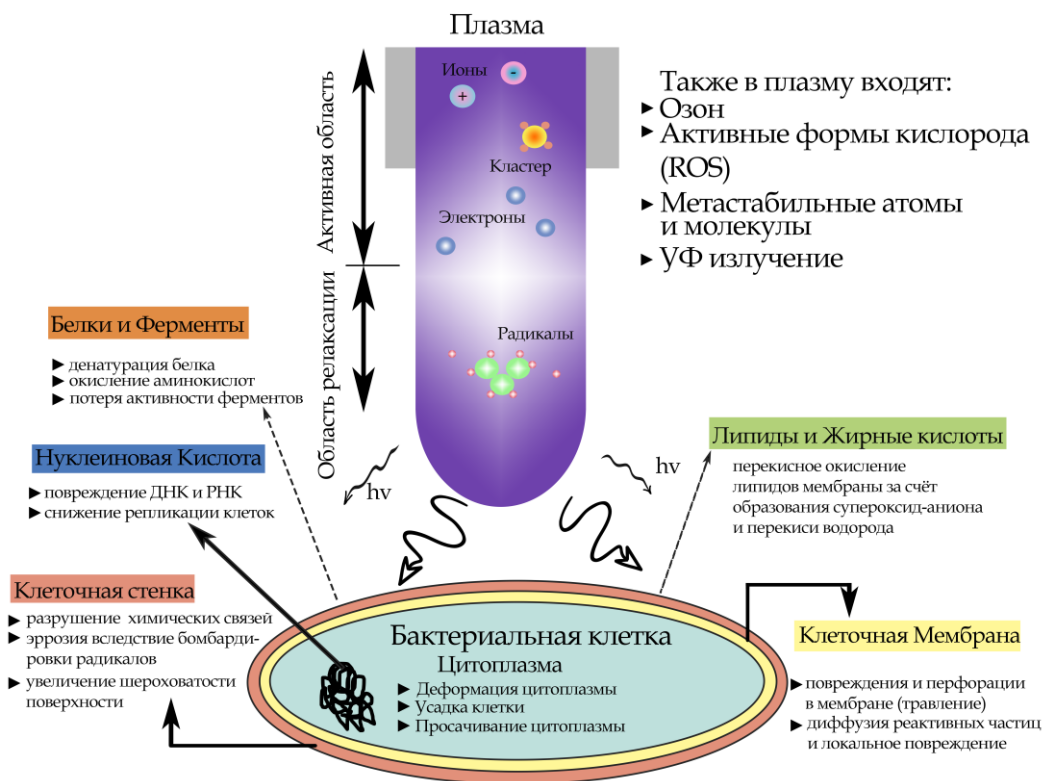


Рис 1. Факторы, оказывающие воздействие на биологический объект

1. Наиболее значимый биологический эффект на бактериальные клетки и живые ткани при действии на них плазмы оказывают активные формы кислорода (озон, кислород в метастабильных состояниях, атомарный кислород, супероксид-анион-радикал, пероксиды, гидроксильные радикалы) и азота (например, радикал NO). Гидроксильная группа (ОН<sup>-</sup>) реагирует с органическими молекулами захватывая у них атомы водорода и производя алкильные радикалы, которые впоследствии быстро окисляются на воздухе. Озон (O<sub>3</sub>), долгоживущая стабильная молекула кислорода, так же является сильным окисляющим агентом. Аналогично гидроксильным группам, озон повреждает стенки бактерий.

2. Уровень кислотности поверхностного слоя биожидкости увеличивается при растворении в ней ионов и активных форм кислорода. Кислоты разъедают стенки бактерий вызывая их гибель. Произведенные плазмой активные химические соединения окисляют органические молекулы формируя углекислый газ и водяной пар.

3. Нагрев биологического объекта. Поскольку энергия инфракрасных лучей относительно мала, то их воздействие приводит к нагреву. Образование тепла приводит к повышению температуры облучаемых кожных покровов не более чем до 37°C.

4. Электромагнитное поле радиочастотного диапазона может влиять на биоорганические молекулы и живые клетки и ткани посредством целого ряда факторов: как термических, так и нетермических.

3. УФ-излучение является доминирующим механизмом бактерицидного действия «холодной» плазмы. УФ-излучение с длинами волн менее 300 нм (180–280 нм) проникает глубоко в клетку и вызывает разрывы в молекулах ДНК вследствие эффекта ионизации, приводящие к гибели микроорганизмов и ингибированию их размножения. УФ-излучение способно инициировать перекисное окисление белков и липидов клеточной мембраны, а также стимулируя образование токсичных соединений в бактериальных клетках.

4. Электроны плазмы, ионы, радикалы, атомы и молекулы в возбужденных состояниях. Взаимодействие электронов плазмы с клеточной оболочкой нарушает ее структуру. Агентами, воздействующими на биологические объекты, являются как заряженные частицы и электрические поля, созданные ими, так и радикалы, и другие нейтральные частицы. При этом химически активные частицы и ионы плазмообразующего газа адсорбируются на поверхности бактерий и вступают в химические реакции с молекулами клеточной оболочки, образуя токсические соединения и вторичные радикалы. Подобные повреждения приводят к выделению индивидуальных микроорганизмов из матрикса (грязь, биопленки, скопления бактерий) на поверхности объекта. Удаляя верхние слои, плазменно-индуцированная эрозия уменьшает экранирование от УФ-излучения [2].

Значимость каждого из перечисленных факторов для эффективности воздействия может изменяться в зависимости от способа реализации. Тем не менее, все эти факторы взаимодействуют между собой и оказывают синергетический эффект.

### **Заключение**

В результате проведенных аналитических исследований нами установлены основные факторы «холодной» плазмы диэлектрического барьерного разряда, оказывающие воздействие на биологические объекты помещенные в нее. Это позволит при проведении экспериментальных исследований сфокусировать внимание на ключевых факторах, что позволит оптимизировать работу и в кратчайшие сроки получить положительный результат.

### **Список литературы**

1. Bekeschus, S., Lippert, M., Diepold, K. et al. Physical plasma-triggered ROS induces tumor cell death upon cleavage of HSP90 chaperone. *Sci Rep* 9, 4112 (2019)
2. Fridman G, Shekhter A B, Vasilets V N, Friedman G, Gutsol A and Fridman A 2008 *Applied plasma medicine Plasma Process. Polym.* 5 503–33