

Оригинальная статья / Original article

УДК 537.523.2

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-3-156-172>

Исследование микроплазменной струи в системе игла – воздух – жидкость – плоскость. Обзор и эксперимент

В.Н. Лесных¹✉, А.И. Жакин¹, А.Е. Кузько¹

¹ Юго-Западный государственный университет
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ е-mail: liesnykh.00@mail.ru

Резюме

Цель исследования – экспериментальное изучение физических процессов в межэлектродном пространстве системы игла – воздух – жидкость – плоскость в сильно неоднородном электрическом поле при положительной игле.

Методы. Используется анализ видеоизображений развития коронного разряда и микроплазменной струи; производятся измерения ВАХ, синхронизированных с видеоизображением.

Результаты. Обнаружен способ получения стабильного потока холодной плазмы в системе электродов игла – плоскость, покрытый слоем слабо проводящей жидкости. Измерены вольт-амперные характеристики в окрестности зажигания коронного разряда. Визуальный анализ спектра свечения позволил оценить ионный состав коронного разряда и микроплазменной струи. Измерены ВАХ на начальной стадии развития МПС. Изучен механизм образования геометрии МПС.

Заключение. Проведённое исследование показало, что система ИВЖП позволяет реализовать новый способ получения устойчивой МПС при положительной игле. Показано, что МПС образуется только при положительной игле. Установлено, что зажигание КР в такой конфигурации происходит при $E^* \approx 3,6$ кВ/см и сопровождается плавным ростом тока, тогда как в системе игла – воздух – плоскость наблюдается участок флуктуаций, обусловленный неустойчивым формированием ионного облака.

Сравнительный анализ напряжённостей поля у острия показал сопоставимость критических значений зажигания КР при различных полярностях, однако механизмы их зажигания различны. Визуальный анализ спектра свечения КР и МПС позволил оценить ионный состав КР и МПС: в системе ИВЖП заметен вклад OH и O_2^+ , что отлично от ИВП, где преобладает свечение N_2 и N_2^+ . Зарождение МПС в системе ИВЖП происходит без предварительного зажигания статичного КР, так как КР сразу перерастает в МПС. Полученные результаты открывают перспективы применения метода для управляемой генерации ХП и расширяют понимание механизмов ионизации при положительной игле.

Ключевые слова: микроплазменная струя; коронный разряд; ион; высокое напряжение; холодная плазма; вольтамперная характеристика.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Лесных В.Н., Жакин А.И., Кузько А.Е. Исследование микроплазменной струи в системе игла – воздух – жидкость – плоскость. Обзор и эксперимент // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2025. Т. 15, № 3. С. 156–172. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-3-156-172>.

Поступила в редакцию 11.08.2025

Подписана в печать 02.09.2025

Опубликована 30.09.2025

Study of microplasma jet in the needle-air-liquid-plane system. Review and experiment

Vasily N. Lesnykh^{1✉}, Anatoly I. Zhakin², Andrey E. Kuzko

¹ Southwest State University
94 50 Let Oktyabrya Str., Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: liesnykh.00@mail.ru

Abstract

The purpose of the research is to experimentally investigation of physical processes in the interelectrode space of the needle-air-liquid-plane system in a strong non-uniform electric field with a positive tip.

Methods. Video images of the development of a corona discharge and a microplasma structure are analyzed; I-V characteristics are measured, synchronized with the video image.

Results. An external method for obtaining a stable cold circuit flow in a needle-plate electrode system coated with a layer of weakly conductive liquid is used. Current-voltage characteristics are measured in a corona discharge environment. Visual analysis of the CR and MPS glow allows one to evaluate the ionic composition of the CR and MPS. CVCs are measured at the initial stage of MPS development. The mechanism of MPS formation is studied.

Results. The study demonstrated that the IVLP system enables a new method for producing stable ion-flux-discharge with a positive tip. The IFD is shown to be consumed only with a positive tip. It was found that IR ignition in this configuration occurs at $E^* \approx 3.6$ kV/cm and a gradual, smooth increase in current, as the tip-air-flux-discharge system exhibits fluctuations due to unstable ion cloud states.

A comparative analysis of the tip field strengths demonstrated that the latest IR ignition parameters are comparable at different polar states, but their ignition mechanisms differ. Visual analysis of the IR and IFD glow spectra allows one to evaluate the ionic composition of the IR and IFD: in the IVLP system, the contribution of OH and O₂⁺ is noticeable, which differs from the IAF system, where N₂ and N₂⁺ emission predominate. The generation of a micro-electron-like particle in the IVZhP system occurs without preliminary ignition of a static CR, as the CR immediately develops into a micro-electron-like particle. The obtained results reveal the potential of this method for the controlled generation of CP and expand our understanding of the principle of ionization with a positive tip.

Keywords: microplasma jet; corona discharge; ion; high voltage; cold plasma; current-voltage characteristic.

Conflict of interest: The Authors declare no apparent or potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Study of microplasma jet in the needle-air-liquid-plane system. Review and experiment. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies.* 2025;15(3):156–172. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2025-15-3-156-172>.

Received 11.08.2025

Accepted 02.09.2025

Published 30.09.2025

Введение

Изучение процессов ионизации в сильно неоднородных электрических полях представляет значительный интерес как с фундаментальной точки зрения, так и для прикладных задач биомедицины, стерилизации и т. д. Наиболее часто такие процессы возникают в окрестности электродов с малым радиусом кривизны, например иглах, где наблюдаются форми-

рования коронного разряда (КР) и струйных ионизационных потоков. При положительной (отрицательной) полярности игл КР называют положительным (отрицательным). По описанию отрицательного КР накоплен обширный материал [1; 2], описана модель образования аэроионов [2, с. 827–828], установлены основные закономерности инициализации разряда. Однако ионизационные процессы вблизи положительной иглы изучены значительно

меньше, что оставляет открытыми вопросы о механизме порогового зажигания и характере развития микроплазменной струи (МПС).

Современные исследования показывают, что ХП, формируемая в системах с сильно неоднородным полем, способна генерировать активные формы кислорода и азота, обладающие высоким потенциалом в дезактивации биологических объектов и стимуляции физиологических процессов [3]. В этом случае вблизи границы воздух – жидкость появляются дополнительные компоненты, что отличает его от газоразрядных процессов в системе игла – воздух – плоскость (ИВП) задачей. Наши эксперименты показали, что при положительной полярности иглы в системе игла – воздух – жидкость – плоскость (ИВЖП) появляется устойчивая микроплазменная струя, тогда как при отрицательной полярности подобной струи не возникает. Этот эффект можно использовать в медицинских целях, например, при кожных операциях, т. к. локализует воздействия микроразряда.

Таким образом, цель данной работы заключается в экспериментальном изучении вольт-амперных характеристик (ВАХ) и спектральных особенностей КР при положительной игле в системе ИВЖП, выявлении условий формирования устойчивой МПС и сопоставлении критических напряжённостей поля с характеристиками отрицательного коронного разряда. Приводится также сравнение ВАХ и КР в системах ИВП с ИВЖП.

Холодная плазма (ХП) – частично ионизированный газ, содержащий электроны, ионы, нейтралы и радикалы, при этом температура ионов и нейтральных частиц остаётся близкой к температуре окружающей среды. Исходя из уникальных физических свойств, данное явление нашло широкое применение в биомедицинских и технологических сферах, особое внимание уделяется генерации ХП в

условиях атмосферного давления. Рубежом между ХП и дуговым разрядом является равновесие температур между электронами и тяжёлыми частицами:

$$T_e \gg T_i \approx T_g, \quad (1)$$

где T_e – температура электронов; T_i – температура ионов; T_g – температура газа.

Неравенство (1) соответствует условиям существования ХП, тогда как при дуговом разряде температуры T_e , T_i , T_g приблизительно равны. Также к ХП относятся стримерные разряды, удовлетворяющие неравенству (1). Это свойство важно для взаимодействия с биологическими или деликатными материалами.

Существует несколько механизмов генерации ХП, одним из которых является КР, который образуется при наличии сильного неоднородного электрического поля вблизи металлизированного электрода, на поверхности которого присутствуют неровности с малым радиусом кривизны [2, с. 824]. Генерация ХП при активном положительном электроде возможна при относительном удалении от противоэлектрода, вблизи электрода или жидкости положительный КР не существует в статичном состоянии, а перерастает в другую форму разряда. Это подтверждается исследованием импульсного положительного разряда вблизи поверхности воды [4] и дальнейшими результатами нашего исследования, отражёнными в данной статье. Описанный метод используется для стерилизации биологически активных сред [5, с. 26], ионизации воздуха и генерации аэроионов.

Диэлектрический барьерный разряд (ДБР) является одной из наиболее широко применяемых технологий для генерации ХП при атмосферном давлении на плоскости. В такой системе разряд формируется между двумя электродами, разделёнными диэлектрическим экраном, что ограничивает ток и предотвращает развитие дуги. Это позволяет получать стабильную,

равномерную плазму, подходящую для обработки поверхностей, газов и жидкостей. Для преодоления носителями заряда диэлектрического барьера используют переменное электрическое поле.

ДБР-системы особенно активно используются в стерилизации упаковок и медицинских изделий, а также для генерации активных форм кислорода и азота в гибридных генераторах [7; 8]. Отдельное внимание уделяется резистивно-барьерным модификациям, позволяющим эффективно работать с малыми разрядными зазорами – такие подходы исследуются в контексте систем игла – плоскость [9, с. 64–72].

Помимо классических барьерных разрядов, в последние годы стремительно развиваются плазменные струи и микроплазменные источники. Эти устройства создают направленные потоки ХП, которые могут использоваться для локального воздействия на ткани, жидкости или поверхности. Гибкие и миниатюрные источники описаны в [10, с. 738–751], где они рассматриваются как инструменты для безболезненной антисептической терапии и стимуляции заживления ран.

Плазменные струи также демонстрируют высокую эффективность в системах доставки лекарств. Например, гибридная методика с использованием ХП и двойной электропорации позволяет достичь высокой эффективности трансдермальной доставки активных веществ [11]. Воздействие микроплазмы на структуру кожи приводит к временному повышению проницаемости эпидермиса без нарушения его барьерных функций [12].

Особую нишу занимают технологии генерации плазменно-активированной жидкости (ПАЖ). Взаимодействие ХП с жидкостью создаёт среду, насыщенную пероксидом водорода, нитритами, синглетным кислородом и супероксид-анионами. Эти активные компоненты придают жидкости выраженные антисептические и

биомодулирующие свойства. Эффективность ПАЖ подтверждена в стерилизации оборудования и очистке продуктов [13], а также в разрушении биоплёнок [14; 15].

ПАЖ становится ключевым элементом в разработке систем доставки биоактивных веществ в ткани, одним из примеров является работа [16], где экспериментально проводится оценка влияния ПАЖ на скорость всасывания маркерного вещества в кишечные эпитеальные клетки, а потенциал её медицинского применения активно изучается [17].

Параллельно с этим развиваются высоковольтные источники ХП. В статье [18] представлен миниатюрный анодный источник ионов, обладающий высоким КПД и длительным сроком службы. Его применение в вакуумной и ионной технике даёт возможность управлять параметрами ионного потока. Катодные системы, включающие лазерно-модифицированные инжектирующие поверхности [19], а также структурированные электроды [20], позволяют реализовать устойчивые и управляемые ионные выбросы. Эти подходы тесно связаны с исследованиями инжекционных процессов в системах типа «отрицательная игла – плоскость», где ионизационные процессы происходят на границе с вязкой жидкостью. Все перечисленные технологии, включая ДБР, плазменные струи, ПАЖ и высоковольтные источники, применяются в различных приложениях – от ветеринарии [21] до молекулярной доставки [22] и комплексной ионотерапии [23].

Материалы и методы

Электроды и жидкости. КР создавался стальной иглой с радиусом закругления кончика $r = 30$ мкм. На поверхности плоского медного электрода располагался тонкий слой медицинского глицерина с проводимостью $6,4 \cdot 10^{-6}$ См/м, толщина слоя 10 мм. Расстояние от кончика иглы до поверхности глицерина изменялась в

пределах от 20 мм до касания поверхности жидкости.

Установка. Измерение ВАХ производилось в системе ИВЖП при атмосферном давлении. Схема измерительной установки представлена на рисунке 1, а. Стальная игла A5 через диэлектрическую проставку фиксируется на штативе A6. На основании штатива установлена ёмкость A4 из органического стекла с глицерином, дно ёмкости изготовлено из стеклотекстолита с полированным слоем меди. Расстояние между головкой штатива с иглой и основанием штатива изменяется с помощью линейного координатного механизма с ценой деления 20 мкм. В роли источника высокого напряжения A11 выступает модернизированный HVLP-6-6000P-A-A-N-A. Доработка источника проводилась в части защиты от разряда, данную цепь отключили, т. к. сама суть эксперимента заключается в исследовании разрядных про-

цессов, а данная защита, даже с учётом плавности нарастания тока, могла аварийно прервать процесс эксперимента. Ток в цепи измерялся с помощью мультиметра UNI-T UT61E+ A10. Напряжение в системе измерялось стрелочным вольтметром A9 с ценой деления 200 В, с встроенным шунтом R1 и внешним сопротивлением шунта $R_2 = 198$ МОм, калибровка проводилась с помощью цифрового осциллографа Micsig MDO5004 и высоковольтного щупа Tektronix P6015A. Видеосъёмка межэлектродного пространства производилась на фотокамеру Canon EOS 1200D с объективом Canon EF-S 18-55mm f/3.5-5.6. Для уменьшения фокусного расстояния от объектива до электродной системы с 250 мм до 20 мм дополнительно установлены поставочные кольца между матрицей и объективом с общей длиной 60 мм.

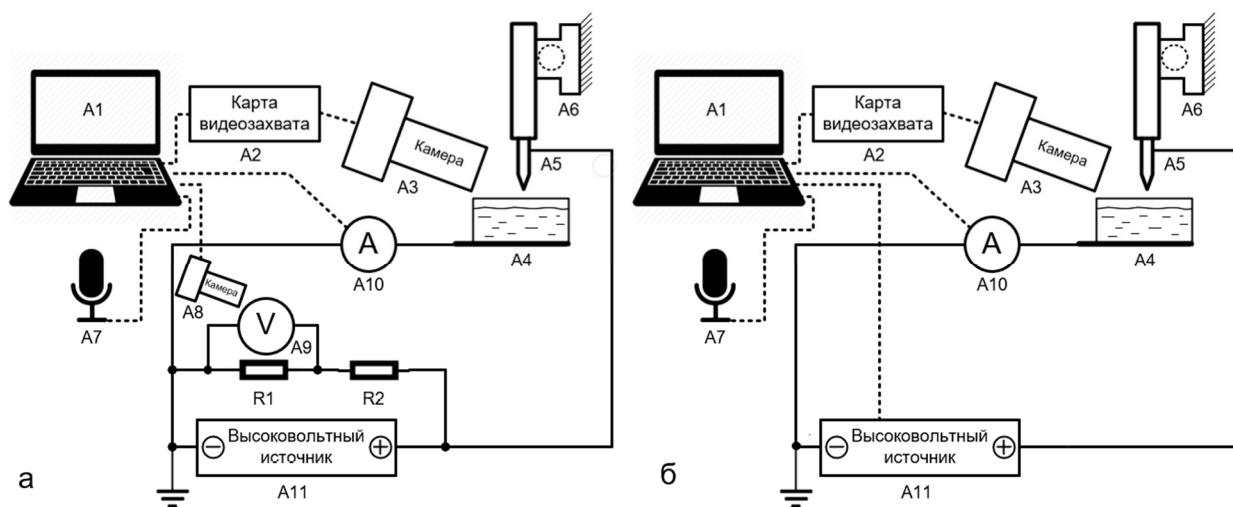


Рис. 1. Общая схема установки: а – с использованием HVLP-6-6000P-A-A-N-A; б – с использованием HVMP-10-30000PN-D-A-A-C

Для удобства считывания ВАХ изображение с основной камеры и показания вольтметра и амперметра синхронно фиксировались на персональном компьютере (ПК) A1 с помощью программы OBS Studio. Пример интерфейсного окна программы представлен на рисунке 2. Изоб-

ражение с камеры A3 считывалось с помощью карты видеозахвата HDMI-USB A2, значение вольтметра A9 фиксировалось с помощью веб-камеры A8, а значение с амперметра A10 считывалось непосредственно через встроенный USB-оптический интерфейс.



Рис. 2. Пример синхронного отображения значения напряжения и тока системы в реальном времени

Fig. 2. Example of synchronous display of system voltage and current values in real time

Также через микрофон А7 с видеопотоком синхронизировался звук. Для получения ВАХ в окрестности зажигания КР аналоговый высоковольтный источник А11 был заменён на цифровой HVMP-10-30000PN-D-A-A-C, а показания напряжения поступали на ПК непосредственно через USB-интерфейс источника (см. рис. 1, б).

Результаты и их обсуждение

На первом этапе эксперимента исследован процесс зажигания КР на расстоянии от поверхности жидкости 10 и 20 мм и измерены ВАХ при положительной игле при наличии слоя глицерина и без глицерина. Результаты измерений ВАХ при толщине жидкого слоя глицерина $h_1 = 10$ мм и различных расстояниях h_2 от кончика иглы до свободной поверхности жидкости показаны на рисунке 3.

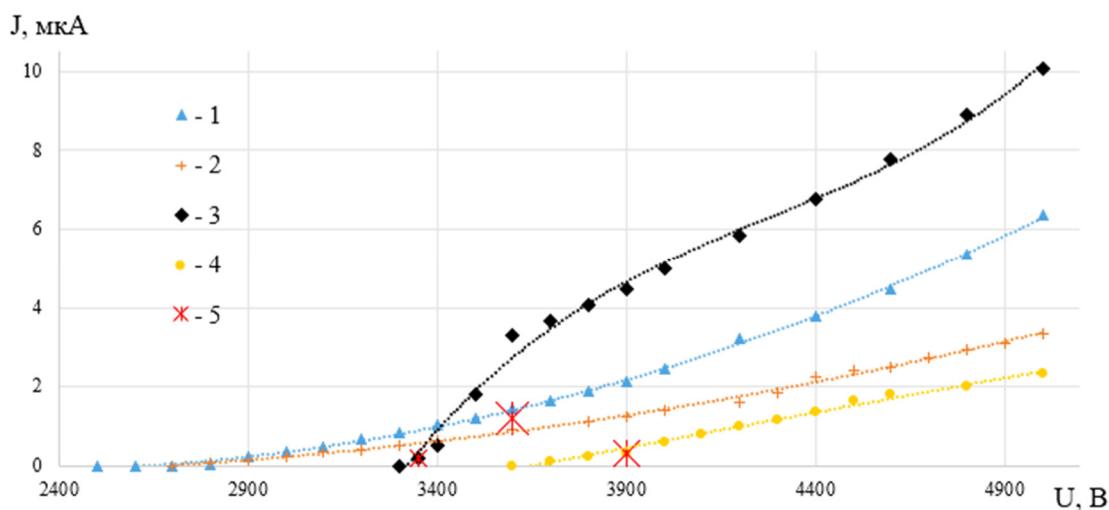


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики, полученные в окрестности зажигания КР в системе ИВЖП и ИВП: 1 – $h_2 = 5$ мм; 2 – $h_2 = 10$ мм; 3 – без глицерина, $h_2 = 10$ мм; 4 – без глицерина, $h_2 = 20$ мм; 5 – напряжение зажигания КР

Fig. 3. High-voltage characteristics obtained in the vicinity of the ignition of the CR in the NALP and NAP system: 1 – $h_2 = 5$ mm; 2 – $h_2 = 10$ mm; 3 – without glycerin, $h_2 = 10$ mm; 4 – without glycerin, $h_2 = 20$ mm; 5 – ignition voltage of the CR

Измерения показали отличия в напряжениях зажигания U_* при наличии и без слоя глицерина. Так при $h_2 = 10$ мм в системе с глицерином $U_* \approx 3,6$ кВ, в системе с воздушным зазором обнаружена нестабильность в зарождении КР при $U_* \approx 3,35$ кВ вплоть до $U \approx 3,6$ кВ. Нестабильность наблюдалась флюктуациями тока и свечения, а при дальнейшем увеличении напряжения КР стабилизировался. Аналогичная закономерность имеет место при расстоянии 20 мм, но в большем диапазоне: от $U_* \approx 3,9$ кВ и до $U \approx 4,8$ кВ.

Здесь следует отметить, что появление КР обуславливается не напряжением на электродах, а напряженностью электрического поля на кончике иглы. Для иглы с малым радиусом кривизны в модели полусферы над плоским электродом можно оценить по формуле [1]

$$E = \frac{U}{r \ln(4d/r)}, \quad (2)$$

где d – зазор. Тогда при $d = 10$ мм и наличии глицериновой пленки имеем $U_* \approx 3,6$ кВ, что согласно (2) дает $E_* = 167$ кВ/см. Для системы игла – плоскость при $d = 10$ мм порог появления нестабильной короны $U_* = 3,35$ кВ, $E_* = 155$ кВ/см. Отсюда видно, что глицериновая пленка приводит к стабилизации E_* с некоторым увеличением напряженности зажигания КР. Из рисунка 3 также следует, что при $d = 20$ мм: порог появления нестабильной короны $U = 3,9$ кВ, $E = 165$ кВ/см; устойчивый КР при $U = 4,8$ кВ, $E = 203$ кВ/см.

Геометрия свечения в начальный момент зарождения КР показана на рисунке 4. Из рисунка видно, что КР формируется в различных локациях относительно острия иглы.

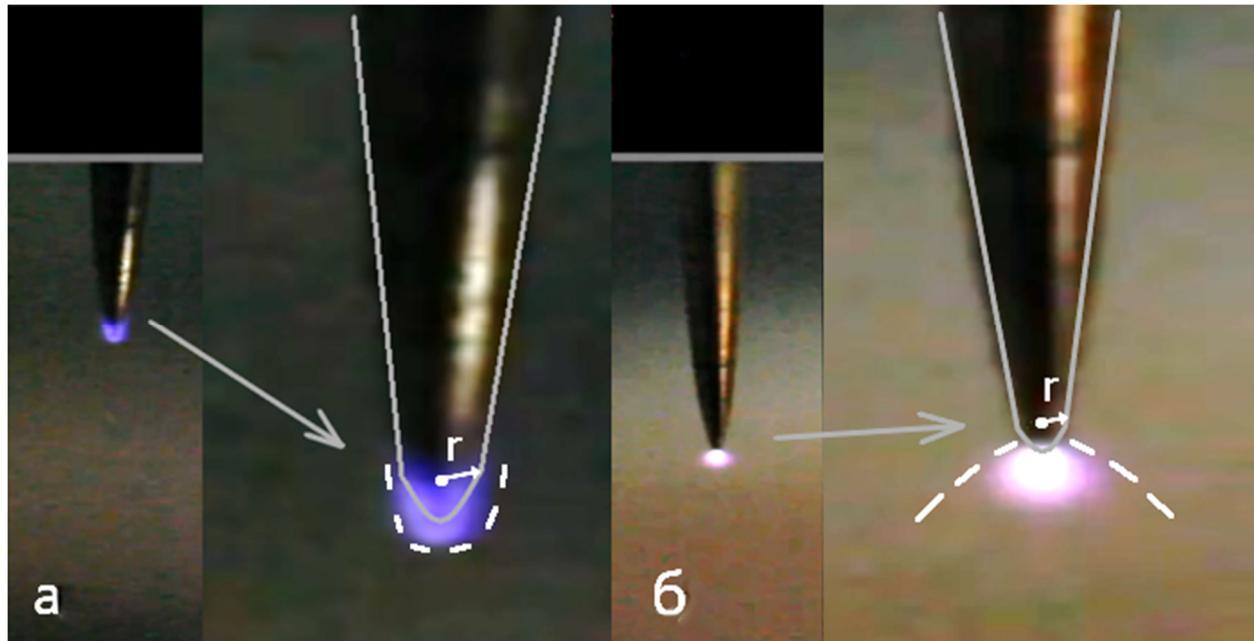


Рис. 4. Положительный КР на игле $r = 30$ мкм в системе ИВЖП (а) при расстоянии иглы в 10 мм над уровнем глицерина, расположенного в виде 10 мм слоя при $U = 8,5$ кВ, $J = 16,19$ мкА; в системе ИВП (б), игла расположена в 10 мм над плоским электродом при $U = 8,5$ кВ, $J = 45,02$ мкА

Fig. 4. Positive CR on the needle $r = 30$ μ m in the NALP (a) system at a needle distance of 10 mm above the glycerol level, located in the form of a 10 mm layer at $U = 8.5$ kV, $J = 16.19$ μ A; in the NAP system (б), the needle is located 10 mm above the flat electrode at $U = 8.5$ kV, $J = 45.02$ μ A

В системе ИВЖП корона тонким слоем покрывает поверхность электрода (см. рис. 4, а). При отсутствии слоя глицерина, т. е. в системе ИВП, корона формируется вблизи кончика острия (рис. 4, б). Различие можно объяснить следующим образом. В случае ИВЖП поверхность жидкости под действием электронного ветра прогибается, образуя своеобразную лунку, глубина которой увеличивается с ростом поля или приближением иглы к

поверхности. На поверхности лунки появляются поверхностные заряды, концентрация которых значительно больше, чем на плоской части жидкости. Это приводит к перераспределению силовых линий напряженности электрического поля так, что плазменное облако прижимается к острию (рис. 5, а). При отсутствии жидкого слоя эффекта прижатия нет, и облако плазмы распределяется на большем участке перед электродом (рис. 5, б).

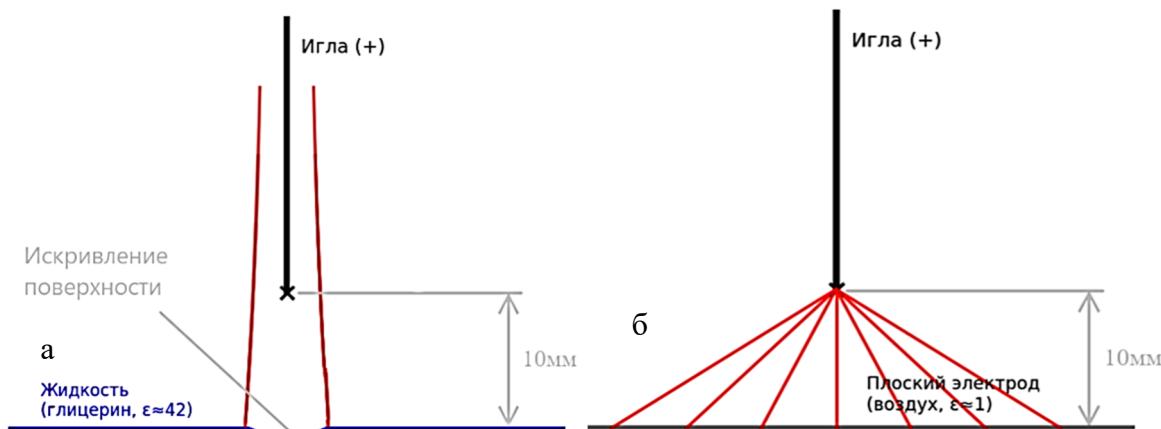


Рис. 5. Силовые линии электрического поля в системе: а – ИВЖП; б – ИВП

Fig. 5. Electric field lines in the system: a – Needle – Air – Liquid – Plane; б – needle–plane

Исследование системы ИВЖП. Динамика развития МПС при различных толщинах h_1 глицерина и различных расстояниях h_2 представлена на рисунках 6–8. Графики измеренных ВАХ показаны на рисунке 9. В момент появления МПС наблюдались флюктуации тока, поэтому показания определялись средним арифметическим по максимальным и минимальным значениям. Появление неустойчивостей обусловлено возникновением автоколебаний тока, описанных для отрицательного КР [1] и для положительной МПС по структуре резистивно-барьерного разряда [9]. В статье [24] рассматриваются механизмы, которые вызывают неустойчиво-

сти свечения и развития стримерного разряда.

Вначале исследовалось образование МПС при контакте иглы с поверхностью глицерина. Фото развития МПС показано на рисунке 6. Из рисунка 6, а видно, что при напряжении $U = 1,8$ кВ наблюдается слабый прогиб поверхности, а по мере увеличения напряжения до 2 кВ появляется МПС, формирующий лунку на поверхности жидкости (рис. 6, б). Отметим, что при расположении электрода вблизи поверхности жидкости ≤ 1 мм КР не существует в статичном состоянии, он сразу развивается до МПС.

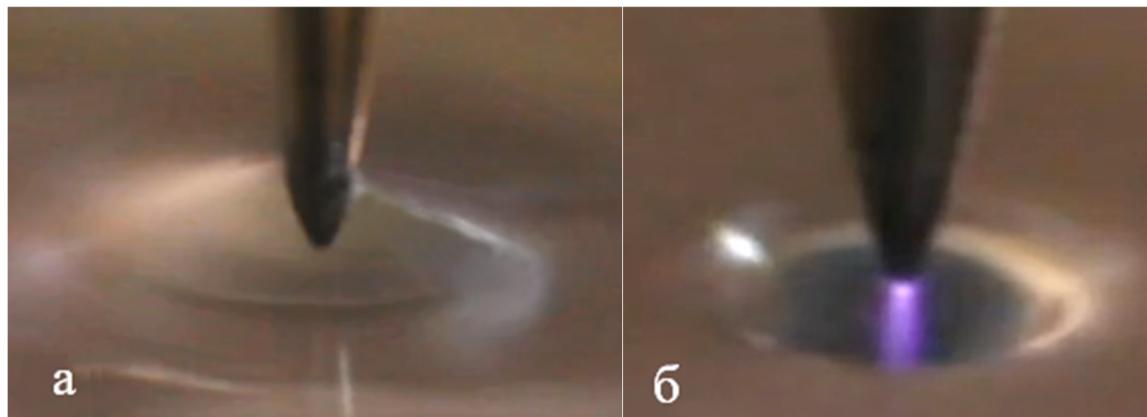


Рис. 6. Развитие МПС при начальном контактном положении иглы с глицерином ($h_2 = 0$): а – $U = 1,8$ кВ, $J = 105$ мкА; б – $U = 2$ кВ, $J = 25$ мкА

Fig. 6. Development of the MPS at the initial contact position of the needle with the liquid: a – $U = 1.8$ kV, $J = 105$ μ A; б – $U = 2$ kV, $J = 25$ μ A

Далее проводились исследования МПС при зазоре 1 мм. Результаты показаны на рисунке 7. Появление МПС происходит на напряжении $U \approx 1,4$ кВ (рис. 7, б). По мере повышения напряжения до 4,6 кВ происходит увеличение размеров МПС и лунки с соответствующим увеличением тока (рис. 7, в-д). Здесь следует отметить,

что зарождение струи с зазором 0,5 мм происходит при напряженности поля на кончике иглы $E^* = 159$ кВ/см, а при зазоре 1 мм – при $E^* \sim 165$ кВ/см. Из этого наблюдения видна тенденция увеличения E^* по мере удаления иглы от поверхности жидкости.

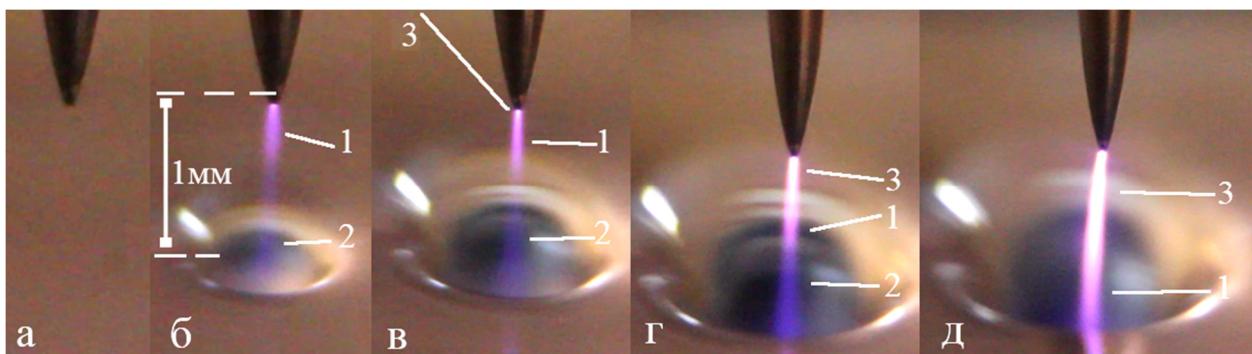


Рис. 7. Развитие МПС и цвета свечений при $h_2 = 1$ мм: а – $U = 1,2$ кВ, $J < 1$ мкА; б – $U = 1,4$ кВ, $J = 22$ мкА; в – $U = 3,4$ кВ, $J = 53$ мкА; г – $U = 4$ кВ, $J = 120$ мкА; д – $U = 4,6$ кВ; $J = 280$ мкА; 1 – пурпурно-фиолетовое; 2 – фиолетово-синее; 3 – белое свечение

Fig. 7. Development of the magnetic flux density and glow colors at $h_2 = 1$ mm: a – $U = 1.2$ kV, $J < 1$ μ A; б – $U = 1.4$ kV, $J = 22$ μ A; в – $U = 3.4$ kV, $J = 53$ μ A; д – $U = 4$ kV, $J = 120$ μ A; г – $U = 4.6$ kV, $J = 280$ μ A; 1 – purple-violet; 2 – violet-blue; 3 – white glow

Важным методом идентификации типов ионов и характера плазмохимических реакций является наблюдение цветовой окраски МПС. В этой связи снимки, представленные на рисунках 7 и 8, делались в

затемненном помещении. Кроме того, получены цветовые фото развития МПС при постоянном напряжении 8 кВ, но при различных межэлектродных расстояниях (рис. 8).

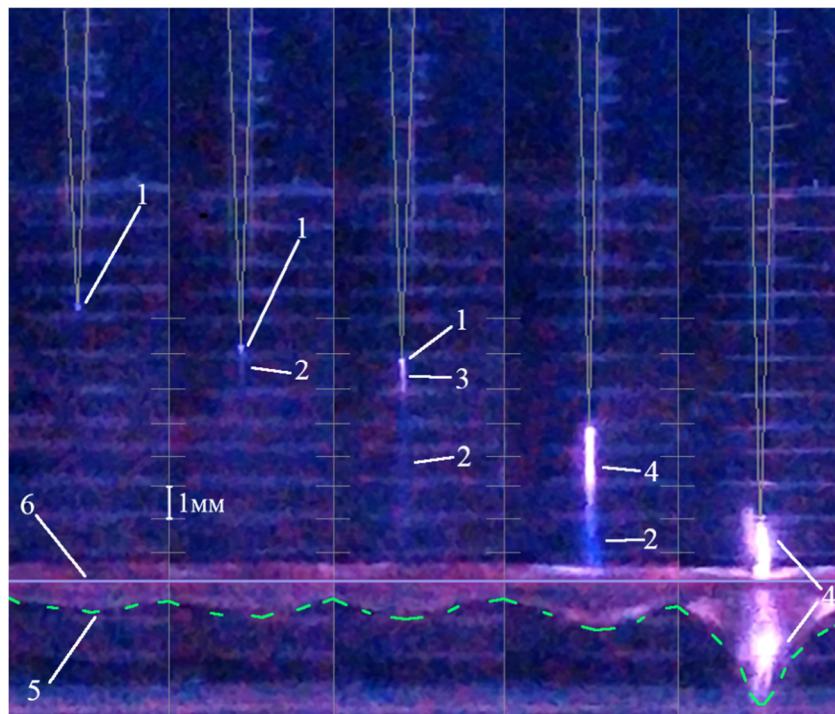


Рис. 8. Цветовая картина свечения МПС при положительном постоянном напряжении на игле 8 кВ, расстояние между горизонтальными метками ~ 1 мм: 1 – зарождение КР; 2 – фиолетово-синее свечение; 3 – пурпурно-фиолетовое свечение; 4 – белое свечение; 5 – образование воронки на поверхности жидкости; 6 – поверхность жидкости

Fig. 8. Color pattern of the MPS glow at a positive constant voltage of 8 kV on the needle, the distance between the horizontal marks is ~ 1 mm: 1 – initiation of the CR; 2 – violet-blue glow; 3 – purple-violet glow; 4 – white glow; 5 – formation of a funnel on the surface of the liquid; 6 – liquid surface

Тот факт, что в системе с глицерином зажигание положительной короны происходит плавно и устойчиво, связан с появлением лунки на поверхности жидкости (см. крайний слева рис. 8 и рис. 5). В свою очередь, образование лунки, на наш взгляд, связано с малой подвижностью положительных ионов в МПС в отличие от подвижности электронов при отрицательной игле. Дополнительными факторами могут быть приповерхностная влага и кислородсодержащие ионы, подавляющие колебания и исключающие флюктуации пространственного заряда. В системе без жидкости поле у острия слабее сфокусировано и сильнее зависит от межэлектродного расстояния d ; при зарождении КР поток ионов меньше, и периодическое формирование положительного ионного облака приводит к нестабильному участку ВАХ.

Анализ свечений КР показывает различие цветовой окраски МПС в исследованных электродных системах. Так в случае ИВП цвет пурпурно-фиолетовый (см. рис. 4, б), тогда как при ИВЖП характерен интенсивный фиолетово-синий (см. рис. 4, а). Разный цвет свечения говорит о различном составе возбужденных молекул и ионов. В первом случае доминирует спектр молекулярного азота N_2 фиолетово-синего (337–406 нм) и красно-оранжевого (600–700 нм) диапазона, а также ионизированных молекул азота N_2^+ (391 нм), что формирует визуально пурпурный оттенок. Во втором случае спектр смешен в более коротковолновую область: помимо азотного диапазона УФ-излучения, проявляются излучения OH радикала (306–310 нм) и O_2^+ (427,8 нм),

связанные с наличием влаги и кислородсодержащих ионов на границе воздух – жидкость, что и определяет «фиолетово-синий» характер свечения [1; 25]. Отметим также, что свечение в лунке, как показано на рисунке 6, г, имеет выраженный фиолетово-синий цвет. Это согласуется с повышенной концентрацией паров жидкости в межэлектродной области и указывает на усиление вклада кислородсодержащих компонентов, что делает спектр свечения МПС отличным от спектра коронного разряда в системе ИВП.

Результаты измерений токов J при разных напряжениях U и разных межэлектродных расстояниях представлены графиками ВАХ (рис. 9). Из рисунка видно, что при малых расстояниях h_2 ВАХ не отличаются. По мере удаления иглы от поверхности жидкости до $h_2 \leq 0,5$ мм токи плавно уменьшаются. Резкое увеличение тока наблюдается при $h_2 = 1$ мм и напряжении $U = 3,9$ кВ. Это можно объяснить проникновением МПС в лунку глицерина, в которой происходит его сильная ионизация (см. рис. 8).

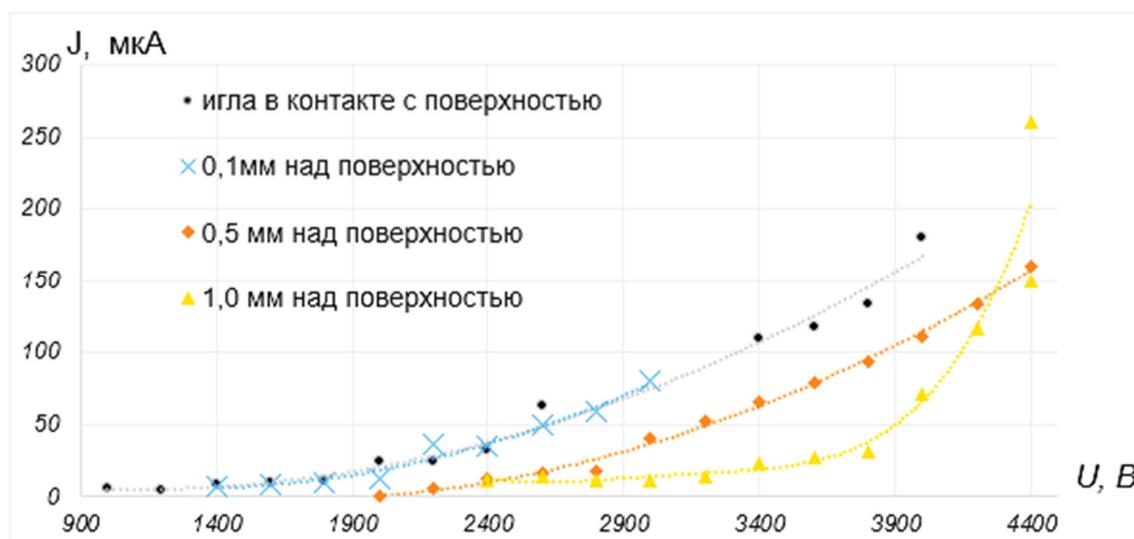


Рис. 9. Вольт-амперные характеристики системы ИВЖП на различном расстоянии между остриём электрода и поверхностью жидкости от контактного начального состояния до зазора в 1 мм

Fig. 9. High-voltage characteristic of the Needle–Air–Liquid–Plane system at different distances between the electrode tip and the liquid surface from the initial contact state to a gap of 1 mm

Отсутствие микроплазменной струи в случае отрицательной полярности иглы можно объяснить тем, что плазменный поток обогащен электронами и отрицательными ионами с высокой подвижностью, что приводит к расплыванию потока на начальном участке струи и к более широкой деформации свободной поверхности

жидкости (рис. 10). Разумеется, эти качественные рассуждения требуют подтверждения численным расчетом. Заметим, что на рисунке 10 при $h_2 = 1,9$ мм и $E = 315$ кВ/см, что в $\sim 1,5$ раза больше напряжённости зарождения МПС при положительной игле, наблюдаем КР без дальнейшего развития МПС.

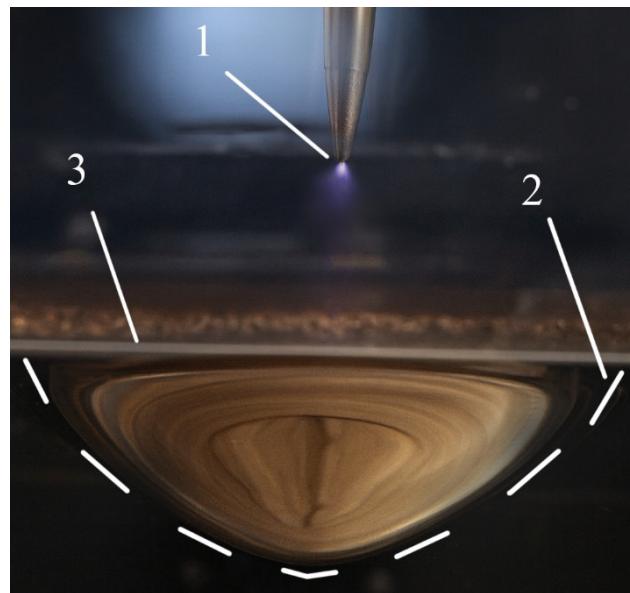


Рис. 10. Отрицательная игла $h_2 = 1,9$ мм, $U = 5$ кВ, $E = 315$ кВ/см: 1 – КР; 2 – поверхность жидкости; 3 – контур воронки

Fig. 10. Negative needle $h_2 = 1.9$ mm, $U = 5$ kV, $E = 315$ kV/cm: 1 – CR; 2 – liquid surface; 3 – funnel contour

В заключение обсудим биологическое действие микроплазменной технологии и пути ее усовершенствования в связи с проведенными исследованиями.

Во-первых, при формировании КР в системе игла – плоскость в воздушной среде при атмосферном давлении формируются активные кислородные и азотные формы, определяющие его биологическое действие. Ионы кислорода O^+ при рекомбинации дают начало образованию озона и супероксида, а в присутствии влаги – пероксида водорода; эти соединения в низких концентрациях оказывают выраженный бактерицидный эффект [3, с. 27], однако в избытке способны вызывать раздражение дыхательных путей и оксидативный стресс [25, с. 221]. Азотные ионы N^+ и возбуждённые молекулы N_2 инициируют образование оксида и диоксида азота (NO , NO_2): оксид азота выполняет физиологическую функцию сигнальной молекулы и стимулирует микроциркуляцию и регенерацию тканей, тогда как диоксид азота при превышении пороговых доз проявляет токсическое действие [17]. Недостатком подобных технологий является тот факт, что при высоких значениях

напряжения не учитывается образование вредных компонентов: озона O_3 , окислов азота и др.

Проведенные исследования показали, что наличие тонкой пленки специальных жидкостей (в данном случае глицерин) при сравнительно низких напряжениях позволяет генерировать полезные компоненты, такие как: гидроксильный радикал OH или органические пары и др. Это обеспечивает быструю инактивацию микроорганизмов и активацию процессов зараживания. Высокие напряжения повышают концентрации вредных компонент и повреждают ДНК и клеточные мембранны.

Выводы

1. Проведённое исследование показало, что использование прослойки глицерина в системе ИВЖП позволяет реализовать новый способ получения устойчивой микроплазменной струи в положительном сильно неоднородном электрическом поле.

2. Установлено, что зажигание положительного коронного разряда в такой конфигурации происходит при напряжён-

ности электрического поля в межэлектродном зазоре $E^* \approx 3,6$ кВ/см и сопровождается плавным и стабильным ростом тока, тогда как в системе ИВП наблюдается участок флуктуаций тока и свечения, обусловленный неустойчивым формированием ионного облака.

3. Сравнительный анализ напряжённостей поля у острия показал сопоставимость критических значений для положительной и отрицательной короны (~ 160 – 200 кВ/см), однако физические механизмы их зажигания различны: для отрицательной короны устойчивость обеспечивается эмиссией электронов с катода, тогда как для положительной ключевую роль играют затравочные ионы и предионизация в межэлектродном промежутке. В случае системы с глицерином высокая диэлектрическая проницаемость жидкости приводит к концентрации силовых линий вдоль оси и формированию прижатого разряда, что обеспечивает стабильность короны и последующее развитие МПС.

4. Визуальная оценка спектра свечения показывает различие в ионном составе: в системе с жидкостью замечен вклад OH и O₂⁺, что отличает её от разряда в воздушном промежутке.

5. Зарождение МПС с зазором 1 мм происходит на напряжении $U^* \approx 2,4$ кВ, напряжённость поля у острия $E^* = 163$ кВ/см, зарождение струи с зазором 0,5 мм на напряжении $U^* \approx 2$ кВ, напряжённость поля у острия $E^* = 159$ кВ/см.

6. При расстоянии от иглы до поверхности жидкости ≤ 1 мм струя зарождается без предварительного зажигания статичного КР, т. к. КР сразу перерастает в микроплазменный разряд. Данный факт подтверждается совпадением напряжённости поля для зарождения КР и микроплазменной струи $E^* \sim 165$ кВ/см. Полученные результаты открывают перспективы применения метода для управляемой генерации ХП или устойчивых стримеров и расширяют понимание механизмов ионизации в сильно неоднородном поле при положительной игле.

Список литературы

1. Жакин А.И., Кузько А.Е. Ионизационные процессы в электродной системе отрицательная игла – плоскость. Эксперимент // Термофизика высоких температур. 2024. Т. 62, № 5. С. 643–654. <https://doi.org/10.31857/S0040364424050016>.
2. Жакин А.И., Кузько А.Е. Ионизационные процессы в электродной системе отрицательная игла – плоскость. Инжекционные процессы // Термофизика высоких температур. 2024. Т. 62, № 6. С. 823–831. <https://doi.org/10.31857/S0040364424060032>.
3. Kristof J., Blajan M.G., Shimizu K. A review on advancements in atmospheric plasma-based decontamination and drug delivery // Journal of Electrostatics. 2025. Vol. 157. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2025.104083>.
4. Herrmann A., Margot J., Hamdan A. Influence of voltage and gap distance on the dynamics of the ionization front, plasma dots, produced by nanosecond pulsed discharges at water surface // Journal of Physics D: Applied Physics. 2022. Vol. 55, no. 27. P. 275202. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac5c24>.
5. Validation of an indirect nonthermal plasma sterilization process for disposable medical devices packed in blisters and cartons / P. Seri, S. Nici, M. Cappelletti, S.G. Scaltriti, A. Popoli, A. Cristofolini [et al.] // Plasma Processes and Polymers. 2023. Vol. 20, no. 8. P. e2300012. <https://doi.org/10.1002/ppap.20230012>.
6. Laroussi M. The resistive barrier discharge: A brief review of the device and its biomedical applications // Plasma. 2021. Vol. 4, no. 1. P. 75–80. <https://doi.org/10.3390/plasma4010004>.

7. Hybrid dielectric barrier discharge reactor: Production of reactive oxygen–nitrogen species in humid air / D. Korzec, F. Freund, C. Bäuml, P. Penzkofer, O. Beier, A. Pfuch [et al.] // *Plasma*. 2025. Vol. 8, no. 2. P. 27.
8. Inactivation of bioaerosol particles in a single-pass multi-stage non-thermal plasma and ionization air cleaner / J. Masionis, D. Ciužas, E. Krugly, M. Tichonovas, T. Prasauskas, D. Martuzevičius // *Plasma*. 2025. Vol. 8, no. 2. P. 22. <https://doi.org/10.3390/plasma8020022>.
9. Маношкин Ю.В., Плотников А.А. Резистивно-барьерный разряд в атмосфере при малых разрядных промежутках для системы электродов «игла – плоскость» // Труды Московского физико-технического института. 2017. Т. 9, № 2. С. 64–72.
10. Becker S., Kornilov P. Flexible sources of cold atmospheric plasma jet // *Plasma*. 2024. Vol. 7, no. 4. P. 738–751. <https://doi.org/10.3390/plasma7040041>.
11. Highly efficient transfection effect of transdermal drug delivery via skin by hybrid bipolar arc plasma stimulation and dual pulse electroporation technique / E.-S. Kim, G. Enkhzaya, H.-S. Hwang, J. Han, C.-S. Kim, J.-W. Shin [et al.] // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 21679–21688. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3056723>.
12. Effect of plasma discharge on epidermal layer structure in pig skin / A.G. Yahaya, J. Kristof, M. Blajan, F. Mustafa, K. Shimizu // *Plasma Medicine*. 2021. Vol. 11, no. 1. P. 1–13. <https://doi.org/10.1615/PlasmaMed.2021039887>.
13. Plasma-activated liquid as a potential decontaminant in healthcare: assessment of antibacterial activity and use with cleaning cloths / M. Fallon, S. Kennedy, S. Daniels, H. Humphreys // *Journal of Hospital Infection*. 2024. Vol. 145. P. 218–223. <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2024.01.008>.
14. A combination of high-voltage atmospheric cold plasma and cinnamaldehyde significantly increases inactivation of *Salmonella enterica* and *Escherichia coli* O157:H7 in raw pineapple juice / B. Lewis, A. Mendonca, P. Fortes-Da-Silva, T. Boylston, A. Little, Brehm-Stecher B. [et al.] // *SSRN Preprint*. 2024. 35 p. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4819317> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4819317>.
15. Superoxide anion in plasma-activated water triggers the removal of *Escherichia coli* biofilm / D. Xia, Y. Zhu, Y. Tang, Y. Yang, X. Chen // *Plasma Processes and Polymers*. 2023. Vol. 20, no. 5. Art. e2200229. 11 p. <https://doi.org/10.1002/ppap.202200229>.
16. Absorption of FD-150 into intestinal cells by microplasma / J. Kristof, A.G. Yahaya, M. Blajan, F. Mustafa, K. Shimizu // *Plasma Medicine*. 2023. Vol. 12, no. 4. P. 11–28. <https://doi.org/10.1615/PlasmaMed.2023047884>.
17. Grebennikov S., Malinovskaya E., Litvinova O. Cold atmospheric plasma medicine: applications, challenges, and opportunities for predictive control // *Plasma*. 2025. Vol. 8, no. 2. Art. 26. <https://doi.org/10.3390/plasma8020026>.
18. Dudnikov V., Dudnikov A. Highly efficient small anode ion source // *Plasma*. 2021. Vol. 4, no. 2. P. 214–221. <https://doi.org/10.3390/plasma4020013>.
19. Лазерно- и магнетронно-модифицированные инжектирующие поверхности электродов для ЭГД-преобразователей / А.Е. Кузько, А.И. Жакин, А.П. Кузьменко, А.В. Кузько, А.А. Прибылов, В.В. Юшин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2022. Т. 12, № 3. С. 147–168. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-3-147-168>.
20. Структурирование катодных электродов для ЭГД-насосов / В.Н. Лесных, А.Д. Паньков, И.В. Пульников, В.Р. Неведров // Актуальные вопросы науки, нанотехнологий, производства (НТ-04): материалы 3-й Международной конференции. Курск: Университетская книга, 2023. С. 89–93.
21. Application of cold plasma therapy for managing subclinical mastitis in cows induced by *streptococcus agalactiae*, *streptococcus uberis* and *escherichia coli* / V. Juozaitienė, V. Jonikė, D. Mardosaitė-Busaitienė, L. Griciuvienė, E. Kaminskienė, J. Radzijevskaja [et al.] // *Veterinary and Animal Science*. 2024. Vol. 25. Art. 100378. 12 p. <https://doi.org/10.1016/j.vas.2024.100378>.

22. Antibacterial approaches in tissue engineering using metal ions and nanoparticles: From mechanisms to applications / M. Godoy-Gallardo, U. Eckhard, L.M. Delgado, Y.J.D. de Roo Puente, M. Hoyos-Nogués, F.J. Gil [et al.] // *Bioactive Materials*. 2021. Vol. 6. P. 4470–4490. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2021.04.042>.
23. Аэроионотерапия в программах комплексной медицинской реабилитации / А.В. Червinskaya, М.А. Хан, И.И. Иванова, Е.В. Филатова // Восстановительные биотехнологии, профилактическая, цифровая и предиктивная медицина. 2025. Т. 2, № 1. С. 46–65. <https://doi.org/10.17116/rbpdpm2025201146>.
24. Positive corona discharge of rod-plate electrodes in high-speed airflow / Q. Wu, Y. Wang, Z. Du, Z. Wu, Y. Deng, X. Wen // *High Voltage*. 2024. Vol. 9, no. 4. P. 337–350. <https://doi.org/10.1049/hve2.12416>.
25. Investigating the influence of free-electron pulses and neutral excited species formation on discharge development: by PD quantum optics analysis and plasma simulation / Y. Feng, Z. Cai, S. Yuan, S. Ma, E. Hui // *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 54510–54523. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3394272>.
26. Thomas J., Volkov A.G. Electrochemical reactions at the boundary areas between cold atmospheric pressure plasma, air, and water // *Plasma*. 2024. Vol. 7. P. 891–903. <https://doi.org/10.3390/plasma7040049>.

References

1. Zhakyn A.I., Kuzko A.E. Ionization processes in the electrode system “negative needle–plane”. *Experiment. High Temperature*. 2024;62(5):643–654. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0040364424050016>.
2. Zhakyn A.I., Kuzko A.E. Ionization processes in the electrode system “negative needle–plane”. Injection processes. *High Temperature*. 2024;62(6):823–831. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0040364424060032>.
3. Kristof J., Blajan M.G., Shimizu K. A review on advancements in atmospheric plasma-based decontamination and drug delivery. *Journal of Electrostatics*. 2025. Vol. 137. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2025.104083>.
4. Herrmann A., Margot J., Hamdan A. Influence of voltage and gap distance on the dynamics of the ionization front, plasma dots, produced by nanosecond pulsed discharges at water surface. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2022;55(27):275202. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac5c24>.
5. Seri P., Nici S., Cappelletti M., Scaltriti S.G., Popoli A., Cristofolini A., et al. Validation of an indirect nonthermal plasma sterilization process for disposable medical devices packed in blisters and cartons. *Plasma Processes and Polymers*. 2023;20(8):e2300012. <https://doi.org/10.1002/ppap.20230012>.
6. Laroussi M. The resistive barrier discharge: A brief review of the device and its biomedical applications. *Plasma*. 2021;4(1):75–80. <https://doi.org/10.3390/plasma4010004>.
7. Korzec D., Freund F., Bäuml C., Penzkofer P., Beier O., Pfuch A., et al. Hybrid dielectric barrier discharge reactor: production of reactive oxygen–nitrogen species in humid air. *Plasma*. 2025;8(2):27.
8. Masionis J., Ciužas D., Krugly E., Tichonovas M., Prasauskas T., Martuzevičius D. Inactivation of bioaerosol particles in a single-pass multi-stage non-thermal plasma and ionization air cleaner. *Plasma*. 2025;8(2):22. <https://doi.org/10.3390/plasma8020022>.
9. Manoshkin Yu.V., Plotnikov A.A. Resistive-barrier discharge in atmosphere at small discharge gaps for the “needle–plane” electrode system. *Trudy Moskovskogo fiziko-tehnicheskogo instituta = Proceedings of the Moscow Institute of Physics and Technology*. 2017;9(2):64–72. (In Russ.)

10. Becker S., Kornilov P. Flexible sources of cold atmospheric plasma jet. *Plasma*. 2024;7(4):738–751. <https://doi.org/10.3390/plasma7040041>.
11. Kim E.-S., Enkhzaya G., Hwang H.-S., Han J., Kim C.-S., Shin J.-W., et al. Highly efficient transfection effect of transdermal drug delivery via skin by hybrid bipolar arc plasma stimulation and dual pulse electroporation technique. *IEEE Access*. 2021. P. 21679-21688. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3056723>.
12. Yahaya A.G., Kristof J., Blajan M., Mustafa F., Shimizu K. Effect of plasma discharge on epidermal layer structure in pig skin. *Plasma Medicine*. 2021;11(1):1-13. <https://doi.org/10.1615/PlasmaMed.2021039887>.
13. Fallon M., Kennedy S., Daniels S., Humphreys H. Plasma-activated liquid as a potential decontaminant in healthcare: assessment of antibacterial activity and use with cleaning cloths. *Journal of Hospital Infection*. 2024;145:218–223. <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2024.01.008>.
14. Lewis B., Mendonca A., Fortes-Da-Silva P., Boylston T., Little A., Brehm-Stecher B., et al. A combination of high-voltage atmospheric cold plasma and cinnamaldehyde significantly increases inactivation of *Salmonella enterica* and *Escherichia coli* O157:H7 in raw pineapple juice. *SSRN Preprint*. 2024. 35 p. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4819317> or. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4819317>.
15. Xia D., Zhu Y., Tang Y., Yang Y., Chen X. Superoxide anion in plasma-activated water triggers the removal of *Escherichia coli* biofilm. *Plasma Processes and Polymers*. 2023;20(5):e2200229. <https://doi.org/10.1002/ppap.202200229>.
16. Kristof J., Yahaya A.G., Blajan M., Mustafa F., Shimizu K. Absorption of FD-150 into intestinal cells by microplasma. *Plasma Medicine*. 2023;12(4):11–28. <https://doi.org/10.1615/PlasmaMed.2023047884>.
17. Grebennikov S., Malinovskaya E., Litvinova O. Cold atmospheric plasma medicine: applications, challenges, and opportunities for predictive control. *Plasma*. 2025;8(2):26. <https://doi.org/10.3390/plasma8020026>.
18. Dudnikov V., Dudnikov A. Highly efficient small anode ion source. *Plasma*. 2021;4(2):214-221. <https://doi.org/10.3390/plasma4020013>.
19. Kuzko A.E., Zhakyn A.I., Kuzmenko A.P., Kuzko A.V., Pribylov A.A., Yushin V.V. Laser- and magnetron-modified injecting electrode surfaces for EHD converters. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2022;12(3):147-168. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2022-12-3-147-168>.
20. Lesnykh V.N., Pankov A.D., Pulnikov I.V., Nevedrov V.R. Structuring of cathode electrodes for EHD pumps. In: *Aktual'nye voprosy nauki, nanotekhnologii, proizvodstva (NT-04): materialy 3-i Mezhdunarodnoi konferentsii = Current Issues in Science, Nanotechnology, and Production (NT-04): Proceedings of the 3rd International Conference*. Kursk: Universitetskaya kniga; 2023. P. 89-93. (In Russ.)
21. Juozaitienė V., Jonikė V., Mardosaitė-Busaitienė D., Griciuvienė L., Kaminskienė E., Radzijevskaja J., et al. Application of cold plasma therapy for managing subclinical mastitis in cows induced by *streptococcus agalactiae*, *Streptococcus uberis* and *Escherichia coli*. *Veterinary and Animal Science*. 2024;25:100378. <https://doi.org/10.1016/j.vas.2024.100378>.
22. Godoy-Gallardo M., Eckhard U., Delgado L.M., de Roo Puente Y.J.D., Hoyos-Nogues M., Gil F.J., et al. Antibacterial approaches in tissue engineering using metal ions and nanoparticles: From mechanisms to applications. *Bioactive Materials*. 2021;6:4470-4490. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2021.04.042>.
23. Chervinskaya A.V., Khan M.A., Ivanova I.I., Filatova E.V. Aeroionotherapy in comprehensive medical rehabilitation programs. *Vosstanovitel'nye biotekhnologii, profilakticheskaya, tsifrovaya*

i prediktivnaya meditsina = Restorative Biotechnologies, Preventive, Digital and Predictive Medicine. 2025;2(1):46-65. (In Russ.) <https://doi.org/10.17116/rbpdpm2025201146>.

24. Wu Q., Wang Y., Du Z., Wu Z., Deng Y., Wen X. Positive corona discharge of rod-plate electrodes in high-speed airflow. *High Voltage*. 2024;9(4):337-350. <https://doi.org/10.1049/hve2.12416>.

25. Feng Y., Cai Z., Yuan S., Ma S., Hui E. Investigating the influence of free-electron pulses and neutral excited species formation on discharge development: by PD quantum optics analysis and plasma simulation. *IEEE Access*. 2024;12:54510-54523. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3394272>.

26. Thomas J., Volkov A.G. Electrochemical reactions at the boundary areas between cold atmospheric pressure plasma, air, and water. *Plasma*. 2024;7:891-903. <https://doi.org/10.3390/plasma7040049>.

Информация об авторах / Information about the Authors

Лесных Василий Николаевич, аспирант, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: liesnykh.00@mail.ru, ORCID: 0009-0001-5400-0431, Researcher ID: NNG-1550-2025

Жакин Анатолий Иванович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: zhakin@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5635-8149

Кузько Андрей Евгеньевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: kuzko@mail.ru, Researcher ID: 7801324495

Vasily N. Lesnykh, Postgraduate Student, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: liesnykh.00@mail.ru, ORCID: 0009-0001-5400-0431, Researcher ID: NNG-1550-2025

Anatoly I. Zhakin, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: zhakin@mail.ru, ORCID: 0000-0001-5635-8149

Andrey E. Kuzko, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Nanotechnology, Microelectronics, General and Applied Physics, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: kuzko@mail.ru, Researcher ID: 7801324495