

МЕХАНИКА
MECHANICS

УДК 537.528

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2245>**Электрический разряд между струйным электролитическим катодом и металлическим анодом**С.Ю. Петряков, Э.Р. Бельгибаев, А.Ф. Гайсин , Р.Р. Каюмов 

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Российская Федерация

✉ almaz87@mail.ru

EDN: MNOFIY

Аннотация

Введение. Газовые разряды с жидкими электродами рассматриваются как перспективный инструмент для улучшения адгезионных свойств и подготовки поверхностей под нанесение покрытий. В литературе подробно изучены тлеющие и дуговые разряды с электролитическими электродами, однако большинство работ сосредоточено на конфигурациях с неподвижным электролитом. Для систем «струйный электролитический катод — металлический анод» при атмосферном давлении формы горения разряда, границы их устойчивости и энергетические характеристики процесса систематизированы недостаточно. Это препятствует масштабированию технологий локальной обработки алюминия. Цель настоящей работы — экспериментально классифицировать формы горения и области их устойчивости, определить электрические, спектральные и тепловые параметры разряда, а также обосновать практические режимы локальной подготовки алюминиевой поверхности под адгезию и покрытия.

Материалы и методы. Для реализации поставленной цели была создана лабораторная установка: струя 3 %-го NaCl выполняла роль катода, алюминиевая пластина АМЦ-40 — анода; узел «струя-анод» размещён в термостатируемой электролитической ячейке с замкнутой циркуляцией раствора. Типичные условия: $U \approx 600$ В, $v_k \approx 0,6\text{--}0,7$ м/с, $d \approx 2$ мм, $\sigma \approx 0,10\text{--}0,12$ $\Omega^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$; источник питания до 4 кВ/10 А обеспечивал широкий диапазон настроек. Диагностика включала осциллографические измерения, высокоскоростную видеосъёмку (Casio EX-F1, 600–1200 к/с), тепловизионную съёмку (FLIR A6500sc) и ОЭС на спектрометре PLASUS EC 150201 MC с оценкой n_e по штарковскому уширению H_α .

Результаты исследования. Обнаружены две топологии локализации плазмы: контактная зона на тройной линии «газ-жидкость-твёрдое тело» и область распада струи. Ток носит импульсный характер с амплитудой 0,8–1,6 А. В спектрах доминируют дублет Na I (~589 нм), полосы OH(A–X) и линия H_α ; по $\Delta\lambda_L$ (H_α) $\approx 0,64$ нм получена оценка $n_e \approx 6,4 \times 10^{16}$ см^{-3} . Термовизионные карты показали максимум эффективной температуры $\sim 47^\circ\text{C}$ в точке контакта и вытянутую вдоль струи зону энерговклада длиной ~ 7 мм (поперечник ~ 2 мм).

Обсуждение. Импульсный характер тока с амплитудой 0,8–1,6 А при 600 В свидетельствует о периодическом формировании и срыве токового канала, что типично для разрядов с нестационарной геометрией катодной области и ранее отмечалось в работах по разрядам со стекающими струями. Оценка электронной концентрации $n_e \approx 6,4 \times 10^{16}$ см^{-3} по штарковскому уширению H_α попадает в диапазон $10^{15}\text{--}10^{17}$ см^{-3} , характерный для атмосферных разрядов с жидкими электродами, и указывает на относительно плотную плазму, достаточную для эффективной активации поверхности. Доминирование линий Na I в спектре подтверждает интенсивный перенос компонентов электролита в разрядный промежуток, что согласуется с механизмом аэрозольного распыления в прикатодной области. Компактность температурного пятна на аноде (поперечный размер ~ 2 мм, максимум 47°C) подтверждает локальный характер энерговклада без глобального перегрева детали, однако истинная температура поверхности может быть выше измеренной из-за неопределённости эмиссивности растущей оксидной пленки.

Заключение. Экспериментально охарактеризован разряд между струйным электролитическим катодом и алюминиевым анодом при атмосферном давлении; показаны две устойчивые топологии горения, импульсная природа тока, спектральные маркеры и тепловая картина энерговклада. Результаты формируют базу для построения режимных карт локальной обработки алюминия и расширения технологических приложений. Полученные данные

составляют основу для построения карты режимов обработки алюминиевых изделий и могут быть расширены за счёт варьирования расхода, диаметра сопла, состава электролита и применения более скоростной диагностики. Направления дальнейших работ: стандартизация энергетических метрик, количественная декомпозиция источников излучения и масштабирование методики.

Ключевые слова: струйный электрод, алюминиевый анод, газовый разряд, импульсные токи, эмиссионная спектроскопия, линии Бальмера, концентрация электронов, тепловизионная диагностика, модификация поверхности

Благодарности. Коллектив авторов выражает благодарность кафедре лазерных и аддитивных технологий при ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ» за предоставленное диагностическое оборудование.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25–29–20147, <https://rscf.ru/project/25-29-20147/>

Для цитирования. Петряков С.Ю., Бельгибаев Э.Р., Гайсин А.Ф., Каюмов Р.Р. Электрический разряд между струйным электролитическим катодом и металлическим анодом. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(2):2245. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2245>

Original Empirical Research

Electric Discharge between a Jet Electrolytic Cathode and a Metal Anode

Sergey Yu. Petryakov, Eduard R. Belgibaev, Almaz F. Gaisin , Rushan R. Kayumov 

Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Kazan, Russian Federation

Abstract

Introduction. Gas discharges with liquid electrodes are considered as a promising tool for improving adhesion properties and preparing surfaces for coating application. Glow and arc discharges with electrolytic electrodes have been investigated in detail in the literature, but most studies focus on configurations with a stationary electrolyte. For “jet electrolytic cathode–metal anode” systems at atmospheric pressure, the discharge combustion modes, their stability limits, and the energy characteristics of the process are insufficiently systematized. This hinders the scalability of localized aluminum processing technologies. The objective of this study is to experimentally classify combustion modes and their stability regions, determine the electrical, spectral, and thermal parameters of the discharge, and substantiate practical modes for localized aluminum surface preparation for adhesion and coating.

Materials and Methods. To achieve this goal, a laboratory setup was built: a 3% NaCl jet served as the cathode, and an AMTs-40 (aluminum-manganese alloy in the RU system, ISO analog: AW-3003) aluminum plate served as the anode. The jet-anode assembly was placed in a temperature-controlled electrolytic cell with closed circulation of the solution. Typical conditions: $U \approx 600$ V, $v_k \approx 0.6\text{--}0.7$ m/s, $d \approx 2$ mm, $\sigma \approx 0.10\text{--}0.12$ $\Omega^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$. A power supply of up to 4 kV/10 A provided a wide range of settings. The diagnostics included oscillographic measurements, high-speed video recording (Casio EX-F1, 600–1200 fps), thermal imaging (FLIR A6500sc), and optical emission spectroscopy (OES) on a PLASUS EC 150201 MC spectrometer with electron density n_e estimated from Stark broadening of H_α .

Results. Two plasma localization topologies were detected: a contact zone on the triple gas-liquid-solid line and a jet breakup region. The current was pulsed with an amplitude of 0.8–1.6 A. The spectra were dominated by the Na I doublet (~589 nm), the OH(A–X) bands, and the H_α line; from $\Delta\lambda_L$ (H_α) ≈ 0.64 nm, an estimate of $n_e \approx 6.4 \times 10^{16}$ cm^{-3} was obtained. Thermal imaging maps showed a maximum effective temperature of ~47°C at the point of contact, and an energy deposition zone elongated along the jet with a length of ~7 mm (diameter ~2 mm).

Discussion. The pulsed nature of the current with an amplitude of 0.8–1.6 A at 600 V indicates the periodic formation and breakdown of the current channel, which is typical for discharges with a nonstationary geometry of the cathode region and has been previously noted in studies on discharges with flowing jets. The estimate of the electron density $n_e \approx 6.4 \times 10^{16}$ cm^{-3} based on the Stark broadening of H_α falls within the range of $10^{15}\text{--}10^{17}$ cm^{-3} , characteristic of atmospheric discharges with liquid electrodes, and indicates a relatively dense plasma sufficient for effective surface activation. The dominance of Na I lines in the spectrum confirms the intense transfer of electrolyte components into the discharge gap, which is consistent with the aerosol sputtering mechanism in the near-cathode region. The compactness of the temperature spot on the anode (transverse size ~2 mm, maximum 47°C) confirms the localized nature of the energy deposition without global overheating of the component. However, the true surface temperature may be higher than the measured one due to the uncertainty in the emissivity of the growing oxide film.

Conclusion. A discharge between a jet electrolytic cathode and an aluminum anode at atmospheric pressure has been experimentally characterized. Two stable combustion topologies, the pulsed nature of the current, spectral markers, and a thermal energy deposition pattern are demonstrated. The results form the basis for constructing operational maps for local aluminum processing and expanding technology applications. The data obtained form the basis for constructing a map of aluminum processing modes and can be expanded through varying the flow rate, nozzle diameter, electrolyte composition, and using faster diagnostics. Future work includes standardizing the energy metrics, quantitatively decomposing the radiation sources, and scaling the methodology.

Keywords: jet electrode, aluminum anode, gas discharge, pulsed currents, emission spectroscopy, Balmer lines, electron concentration, thermal imaging diagnostics, surface modification

Acknowledgements. The team of authors appreciates the Department of Laser and Additive Technologies, KNITU-KAI, for the provided diagnostic equipment.

Funding Information. The research is done with the support from the Russian Science Foundation (grant no. 25–29–20147), <https://rscf.ru/project/25-29-20147/>

For Citation. Petryakov SYu, Belgibaev ER, Gaisin AF, Kayumov RR. Electric Discharge between a Jet Electrolytic Cathode and a Metal Anode. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(2):2245. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2245>

Введение. Газоразрядная плазма, формируемая в межэлектродном промежутке, где один или оба электрода являются жидкостью, представляется одним из перспективных направлений исследований в области механики жидкости, газа и плазмы, а также современных технологий обработки материалов [1]. Одной из востребованных конфигураций выступает система со струйным электролитическим катодом и металлическим анодом, в которой функции катода выполняет проточная струя электролита [2]. Подобная схема позволяет формировать локальную катодную область с газоразрядной плазмой и обеспечивает гибкую настройку параметров процесса [3]. Локальный энерговклад в зоне катодного пятна, эффективный теплоотвод через жидкие электроды, а также оперативное удаление продуктов реакции обуславливают высокую результативность данной конфигурации при локальной обработке поверхностей малогабаритных металлических изделий [4], проведении очистки [5], удалении заусенцев и нанесении функциональных покрытий [6].

Механизм разряда со струйным электролитическим катодом определяется сложным межфазным взаимодействием в трехфазном узле «газ – жидкость – твердое тело» [7]. На характер горения и устойчивость процесса существенное влияние оказывают электрические параметры (напряжение, ток, мощность, вид питания — постоянный или ВЧ-ток) [8], гидродинамика струи (расход, скорость течения, диаметр сопла, уровень турбулентности) [9], термические и массообменные явления (испарение, дегазация) [10], химический состав и удельная электропроводность электролита [11], а также давление и состав окружающей газовой среды [12]. Для таких систем характерны смена режимов горения, возникновение самовозбуждающихся колебаний и срывов, а также выраженная нелинейность вольтамперных характеристик [13]. В сравнении с разрядом на твердом катоде структура приэлектродного слоя у жидкого катода специфична: ключевую роль играют ионная бомбардировка поверхности струи, вторичная электронная эмиссия на границе раздела сред, микроплески и микроразряды на газовых включениях, а также электродинамическая стабилизация или дестабилизация мениска [14].

Практическая значимость таких разрядов обусловлена возможностью направленного изменения микрорельефа и состояния приповерхностного слоя металлического анода без критического термического воздействия на деталь. Это позволяет: формировать активные функциональные группы; регулировать смачиваемость поверхности; проводить очистку от оксидных пленок и органических загрязнений; инициировать центры зародышеобразования для последующего осаждения покрытий; повышать показатели микротвердости и коррозионной стойкости. Локальный характер воздействия особенно актуален для малогабаритных деталей со сложной геометрией, где традиционные механические и электрохимические методы неприменимы. Для промышленного производства наиболее важной задачей остается определение оптимальных режимов обработки, связывающих характеристики разряда и параметры струи электролита.

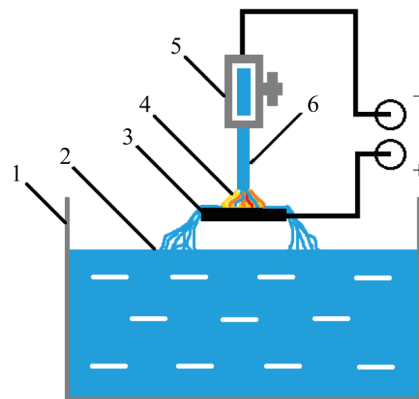
Вместе с тем данная область исследований на сегодняшний день изучена недостаточно. Не в полной мере описаны условия перехода между различными формами горения разряда в зависимости от электродинамических и гидродинамических факторов. Требуется разработка математических моделей слоя в области жидкого катода, учитывающих процессы генерации парогазовой оболочки. Необходима систематизация режимов в виде карт, где электрические характеристики (удельный энерговклад на единицу площади поверхности, вольтамперные кривые) сопоставлялись бы с итоговыми функциональными свойствами материала. С позиции диагностики востребованы: высокоскоростная визуализация межэлектродных процессов; прецизионная регистрация вольтамперных характеристик и осцилляций тока; оптическая эмиссионная спектроскопия для идентификации состава плазмы, определения концентрации и температуры электронов, а также температуры тяжелой компоненты.

Целью данной работы является установление форм горения электрического разряда между струйным электролитическим катодом и алюминиевым анодом, выявление областей их устойчивого существования, а также комплексное определение электрофизических, спектральных и тепловых характеристик. Полученные результаты ориентированы на создание научно обоснованных рекомендаций по финишной подготовке и модификации изделий из алюминия и его сплавов.

Материалы и методы. Зажигание и устойчивое горение струйного электрического разряда с жидкой плазмой образующей средой при локальном воздействии на металлический анод были реализованы на лабораторной установке, в которой проточная струя электролита выступает катодом, а металлическая пластина — анодом (рис. 1 а). Конструктивно узел «струя – анод» размещен в объеме электролитической ячейки (рис. 2 б), оснащённой системами подвода и отвода раствора, термостатирования и штатной вытяжной вентиляции рабочей зоны.



а)



б)

Рис. 1. Экспериментальная установка для зажигания газоразрядной плазмы:

- а — фотография экспериментальной установки; б — функциональная схема газоразрядной камеры для поддержания струйного разряда с жидким катодом при взаимодействии с поверхностью металлического анода, где:
1 — электролитическая ячейка; 2 — электролит; 3 — металлический анод (алюминиевая пластина);
4 — зона горения разряда; 5 — сопло подачи/регулировки струи; 6 — струя электролита (катод)

В качестве анода использовалась алюминиевая пластина марки АМц-40, закреплённая в ячейке; катод образовывала непрерывная струя 3 %-го водного раствора NaCl, приготовленного на очищенной водопроводной воде. Перед запуском на сопло и струю подавали отрицательный потенциал, на алюминиевую пластину — положительный. Струю формировали через сменное сопло; расход задавали регулирующим краном с контролем по расходомеру. Для стабильности характеристик раствора предусматривалось термостатирование: циркуляционный охладитель рефрижераторного типа удерживал температуру в заданных пределах, а обновление электролита осуществлялось по замкнутому контуру с фильтром грубой очистки для удаления механических примесей. Пары и аэрозоли из рабочей зоны удалялись стационарной вытяжкой. Все токоведущие и корпусные элементы имели защитное заземление.

Питание разряда обеспечивал высоковольтный источник до 4 кВ с номинальным током до 10 А и плавной регулировкой, включающий высоковольтный и низковольтный каналы. Это позволяло гибко задавать диапазоны напряжения и тока, а также запитывать вспомогательные датчики. Текущие значения U и I выводились на панельные индикаторы и дублировались на управляющем ПК для оперативного контроля. В типовых сериях опытов параметры составляли: напряжение $U = 0,1\text{--}1,1$ кВ; давление $p \approx 10^5$ Па (атмосферное); скорость струи $v_k = 0,5\text{--}0,7$ м/с; диаметр струи $d = 2$ мм; длина струи $l = 15$ мм; удельная электропроводность раствора $\sigma = 0,10\text{--}0,12$ Ом⁻¹·см⁻¹; температура $T = 12\text{--}64$ °С. Полярность электродов во всех режимах сохранялась: струя — катод, пластина — анод.

Диагностический комплекс включал взаимодополняющие методы визуализации, теплового и электрического контроля, а также оптическую эмиссионную спектроскопию.

1. Высокоскоростная видеосъёмка динамики факела и приэлектродных структур выполнялась камерой «Casio EX-F1» со скоростями 600 и 1200 к/с. Камеру устанавливали на штатив на расстоянии около 300 мм от зоны разряда; передача и первичная обработка данных производились на ПК с использованием ПО «HX Link» и «Movavi Video Editor 14 Plus». Съёмка позволяла фиксировать форму и колебания катодной струи, а также эволюцию анодного пятна.

2. Для картирования температурного поля на поверхности анода и в окрестности катодной струи применялась тепловизионная камера «FLIR A6500sc» (640×512 пикселей; 3,6–4,9 мкм) с калибровкой по многоволновому пирометру. Это компенсировало изменения эффективной излучательной способности, связанные с образованием и ростом оксидной плёнки на алюминии. Анализ термограмм выполнялся в программном пакете «ALTAIR v5.91.010».

3. Пульсации тока и напряжения регистрировались цифровыми осциллографами «GDS-806S» и «GOS-6030». Для синхронизации электрических сигналов с оптическими событиями использовался фотодиодный датчик излучения разряда, подключённый к осциллографу. Такой подход обеспечивал привязку моментов зажигания, переходов между формами горения и всплесков к визуально наблюдаемым изменениям факела.

4. Оптическая эмиссионная спектроскопия осуществлялась на оптико-волоконном спектрометре «PLASUS ES 150201 MC» в диапазоне 195–1105 нм. Излучение собиралось коллиматором, подведённым к зоне горения на расстояние 100–200 мм. Градуировку аппаратной функции проводили по источнику «СИРШ 6-100»; аппаратная ширина составила $\Delta\lambda_g \approx 1$ нм. Спектры сопоставлялись с базой данных NIST. По профилям линий водорода серии Бальмера оценивали концентрацию электронов (по уширению H_α).

Набор средств и режимов обеспечил репрезентативные, воспроизводимые измерения и сопоставление электрических, спектральных, тепловых и визуальных характеристик струйного разряда с жидким катодом и локального воздействия на поверхность металлического анода.

Результаты исследования. На фотографиях (рис. 2) показано, что при полярности «струйный электролитический катод — алюминиевый анод» разряд при $U = 600$ В, $p = 10^5$ Па и скорости струи $v_k = 0,6$ м/с локализуется в двух характерных областях: 1 — в зоне непосредственного контакта струи с поверхностью анода (рис. 2 а) и 2 — в районе распада струи (рис. 2 б).

В первом случае формируется приэлектродная светоизлучающая область, привязанная к «пятну контакта» и линии тройного сечения «газ — жидкость — твердое тело». Во втором — свечение и микроразрядные события возникают на шейках и каплях распадающейся струи, где кривизна поверхности и локальные газовые включения усиливают поле и уменьшают эффективную длину промежутка.

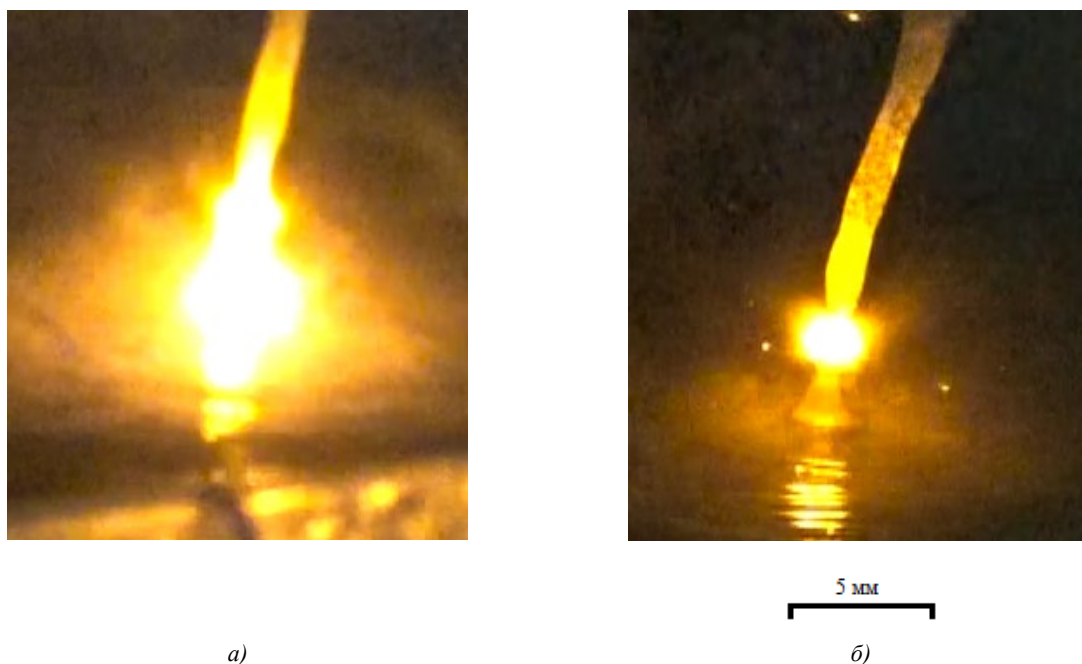


Рис. 2. Струйный электрический разряд между струйным анодом и алюминиевым катодом при $U = 600$ В, $I = 1,6$ А, $p = 10^5$ Па, $v_k = 0,6$ м/с: а — на границе между струей и металлической поверхностью; б — в зоне распада струи

Характерная жёлтая окраска факела в обоих случаях обусловлена главным образом интенсивным излучением резонансного дублета натрия (≈ 589 нм), возникающим за счёт испарения/аэрозольного выброса Na-содержащих компонентов из струи 3 %-го раствора NaCl в прикатодной зоне и их последующей диссоциации-возбуждения в объёме разряда. Вклад непрерывного излучения от разогретых аэрозольных частиц и локальных оксидных включений может придавать оранжево-жёлтый оттенок в моменты пикового энерговклада, но остаётся вторичным по отношению к линиям Na.

Осциллограммы тока (рис. 3) при фиксированном напряжении $U = 600$ В демонстрируют импульсный характер проводимости: ток реализуется сериями импульсов амплитудой порядка 0,8–1,6 А. Такая интермиттирующая структура соответствует чередованию стадий усиления и ослабления эмиссии электронов на границе газ — жидкость и периодическому «переключению» канала проводимости между двумя геометриями — «пятно на поверхности металлического электрода» и «в зоне распада струи».

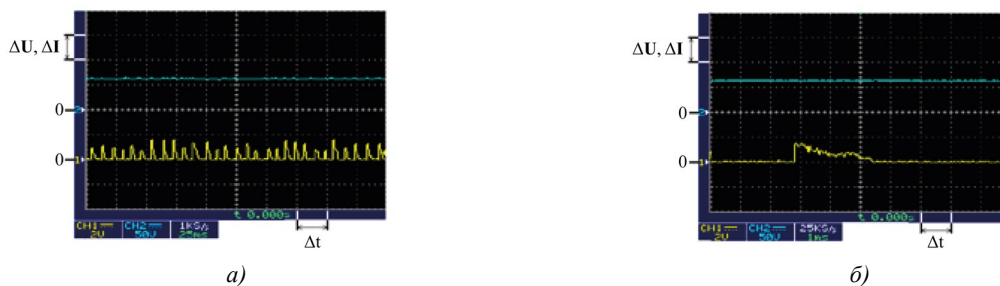


Рис. 3. Осциллограммы колебания тока и напряжения разряда между струйным катодом и алюминиевым анодом:
 а — при $p = 10^5$ Па, $\Delta U = 500$ В, $\Delta I = 2$ А, $\Delta t = 25$ мс; б — при $p = 10^5$ Па, $\Delta U = 500$ В, $\Delta I = 2$ А, $\Delta t = 5$ мс

Гидрогазодинамические процессы, включая образование газовых пузырьков, возникновение конвективных потоков, а также специфику течения и скорость струи — наряду с сопутствующими вариациями межэлектродного расстояния и геометрии катодного пятна — обуславливают флуктуации плотности тока и напряжённости электромагнитного поля. Данные явления фиксируются на осциллограмме в виде характерных импульсных областей (рис. 3).

Электрические сигналы, полученные при помощи осциллографа, были сопоставлены с данными оптической регистрации свечения разряда. Установлено, что импульсы тока по времени коррелируют с возникновением интенсивного излучения в зоне горения. Это свидетельствует о том, что определяющее значение в инициации импульсов имеют быстротекающие микрособытия в прикатодной области, трансформирующие условия формирования катодного слоя и провоцирующие микроразряды по направлению к аноду.

В данной конфигурации электродов источниками первичных электронов, для лавинной ионизации и последующей ионизации в объеме могут выступать следующие механизмы образования заряженных частиц: (1) вторичная электронная эмиссия с поверхности жидкого катода под действием бомбардировки положительными ионами и быстрыми нейтральными частицами; (2) автоэлектронная эмиссия с сильно искривлённых участков, где локально возрастает напряжённость поля; (3) фотоэлектронная эмиссия с поверхности струи под действием излучения из объёма разряда; (4) эмиссия из газовых пузырьков, прилегающих к катоду, где пониженная эффективная работа выхода и концентрация поля облегчают инжекцию электронов; (5) отрыв электронов от отрицательных ионов в приэлектродном слое.

На рис. 4 приведён эмиссионный спектр излучения плазмы разряда между струйным электролитическим катодом и алюминиевым анодом с идентифицированными полосами и линиями.

Регистрируются полосы ОН ($A \rightarrow X$), а также атомарные линии Н I, Na I, N I и К I. Наличие интенсивного резонансного дублета Na I ($\approx 589,0/589,6$ нм) согласуется с визуально наблюдаемой жёлтой окраской факела: натрий попадает в разрядную зону из 3 %-го раствора NaCl посредством испарения из прикатодной области, после чего возбуждается в объёме плазмы.

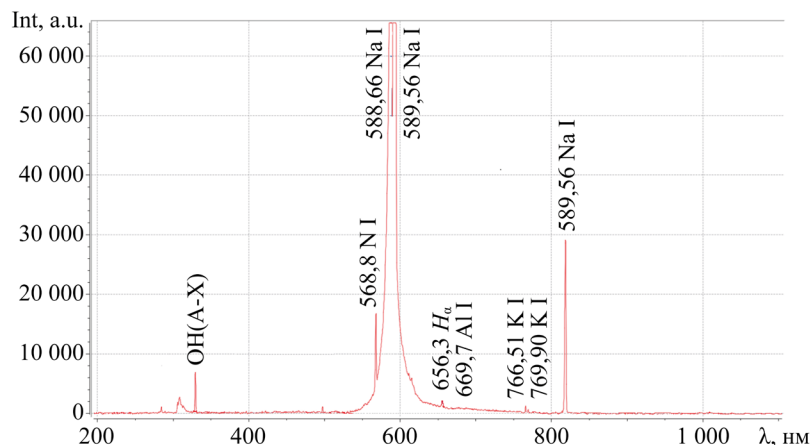


Рис. 4. Спектр излучение плазмы разряда между струйным катодом и алюминиевым анодом
 с отождествленными спектральными линиями

Аппаратное уширение оценивали по оптически тонкой линии К I (769,9 нм); минимальная полуширина узких линий составила $\Delta\lambda_G \approx 1,0$ нм и далее принималась как гауссова составляющая аппаратной функции. Наблюдаемые профили линий аппроксимировали фойгтовым контуром; для связи фойгтовой ($\Delta\lambda_F$), лоренцевой ($\Delta\lambda_L$) и гауссовой ($\Delta\lambda_G$) полуширин использовали приближение [15]:

$$\Delta\lambda_F \approx 0,5346 \cdot \Delta\lambda_L + \sqrt{0,2166 \cdot \Delta\lambda_L^2 + \Delta\lambda_G^2}.$$

Из него находили $\Delta\lambda_L$ при известных $\Delta\lambda_F$ и $\Delta\lambda_G$, тем самым исключая вклад приборного уширения.

Для линии H_α (656,28 нм) измеренная полуширина фойгтовского контура составила $\Delta\lambda_F(H_\alpha) = 1,38$ нм. С учётом аппаратной составляющей получена лоренцева полуширина $\Delta\lambda_L(H_\alpha) \approx 0,64$ нм. По температурно-зависимым коэффициентам рассчитана электронная концентрация $n_e \approx 6,4 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Такое значение концентрации электронов характерно для атмосферного давления, где доминирует линейное штарковское уширение водородных линий.

В данной серии H_β (486,13 нм) не зарегистрирована из-за низкого отношения сигнал/шум в канале и настройки экспозиции под яркие жёлтые линии Na I, что не препятствует оценке n_e по H_α .

Таблица 1

Сводные спектральные параметры для оценки n_e по линии H_α

Параметр	Значение	Примечание
$\Delta\lambda_F(H_\alpha)$	1,38 нм	Полуширина фойгтовского контура
$\Delta\lambda_L(H_\alpha)$	$\approx 0,64$ нм	Лоренцева составляющая (без приборного уширения)
n_e	$\approx 6,4 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$	Оценка по штарковскому уширению H_α

Совокупность наблюдаемых полос и линий подтверждает смешанную природу плазмообразования (воздух + продукты распыления электролита). Жёлтая окраска факела обусловлена доминированием Na I линий, а оценка по уширению H_α даёт электронную концентрацию порядка 10^{16} см^{-3} при исследуемых режимах.

Термографический анализ зоны разряда. На термограммах (рис. 5) за начало координат принято положение, соответствующее области контакта струйного электролитического катода с алюминиевым анодом (линия «газ — жидкость — твёрдое тело»).

В этой точке фиксируется максимальная эффективная температура $T = 47^\circ\text{C}$. При движении к источнику струи электролита, то есть вдоль струи, температура убывает в пределах первых 7 мм, что указывает на вытянутую вдоль струи плазменную область длиной порядка 7 мм и эффективным поперечным размером 2 мм. Вне плазменной зоны профиль температуры переходит к экспоненциальному спаду до температуры окружающей среды. При движении в сторону алюминиевого анода температура также резко падает до уровня 22°C . Такая асимметрия профиля объясняется высокой теплопроводностью алюминия и эффективным теплоотводом в объём детали, а также интенсивным конвективным охлаждением прилегающим электролитом. Температурное «пятно» на анодной поверхности компактно и привязано к зоне контакта. Это соответствует картине направленного энерговклада из разряда, вытянутого по струе катода.

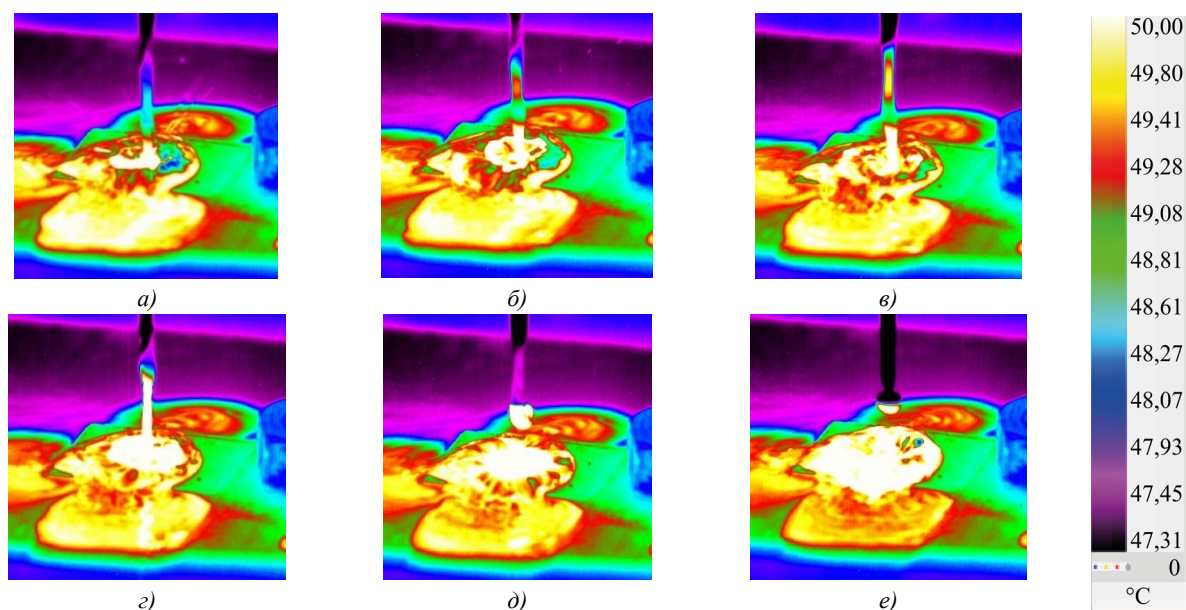


Рис. 5. Динамика распределения температуры струйного электролитического катода (термограммы, $t = 0\text{--}5$ с, $\Delta t = 1$ с): а — 0 с; б — 1 с; в — 2 с; г — 3 с; д — 4 с; е — 5 с

Обсуждение. Исходя из полученных данных, следует, что плазменные структуры локализуются в двух областях системы: (1) — в области контакта струйного электрода с поверхностью обрабатываемого изделия и (2) — в зоне утончения и распада струйного электрода.

В первом случае максимальный энерговклад разряда локализуется в области катодного пятна на поверхности металлического анода, во втором — смещается к области сужения и распада струйного электрода, где геометрия поверхности и парогазовый промежуток усиливают электромагнитное поле. Такое поведение струйного электрода объясняет изменения проводимости и, как следствие, колебания тока в диапазоне 0,8 – 1,6 А при напряжении около 600 В.

Импульсный характер горения разряда обусловлен взаимосвязью электрических параметров разряда, катодного слоя и гидродинамики струи. Динамика течения струи, сопровождающаяся образованием локальных областей сужения и распада струи, приводит к нестационарному изменению геометрии катодной области и изменению напряженности электрического поля. В этих условиях формируются кратковременные микроразряды в парогазовой области между анодом и катодом, что проявляется в виде последовательных импульсов тока, коррелирующих со свечением плазмы разряда. Запуск таких импульсов определяется совокупным вкладом различных механизмов электронной эмиссии, включая вторичную эмиссию под действием ионной бомбардировки, автоэлектронную эмиссию, а также инжекцию электронов в объем плазмы с поверхности прикатодного слоя.

Анализ эмиссионных спектров указывает на комбинированный характер газоразрядной плазмы, формируемой как за счёт компонентов окружающего воздуха, так и элементов, дислоцированных из электролита. Интенсивное излучение фиксируется на линии Na I в области около 589 нм, что определяет преобладание желтого цвета горения разряда. Регистрация полос OH (A–X) и линии H_α свидетельствует о протекании газозависимых процессов с участием водорода и гидроксильных радикалов. Оценка электронной концентрации, выполненная по Штарковскому уширению линии H_α ($\Delta\lambda_L \approx 0,64$ нм), составляет $n_e \approx 6,4 \times 10^{16}$ см⁻³.

Термографические измерения демонстрируют формирование локализованной зоны нагрева на поверхности металлического анода с максимальной температурой около 47 °С. Пространственная асимметрия температурного поля обусловлена высокой теплопроводностью алюминия, обеспечивающей интенсивный отвод тепла в объём материала и конвективным охлаждением со стороны электролита. Зафиксированные температурные значения не определяют механизм активации поверхности алюминия. Изменение свойств поверхностного слоя реализуется за счёт неравновесного воздействия газоразрядной плазмы, включающего поток заряженных частиц, активные химические компоненты и локальные электрические поля в прианодной области, а не вследствие термического разрушения оксидной плёнки Al_2O_3 .

С точки зрения практической реализации процесс характеризуется наличием устойчивых режимных областей, определяемых совокупностью электрических параметров (напряжение, ток), гидродинамических характеристик струи (скорость, диаметр, длина промежутка) и электропроводности раствора.

К ограничениям проведённого исследования следует отнести конечное спектральное разрешение используемого оборудования (~1 нм), что накладывает ограничения на интерпретацию узких линий и делает предпочтительным использование линии H_α при оценке электронной концентрации. Дополнительным фактором является фиксированный состав электролита (3 % NaCl), тогда как изменение ионного состава и pH может существенно влиять на кинетику возбуждения и тепловой баланс системы. Указанные обстоятельства определяют направления дальнейших исследований.

Осмотр обработанной поверхности алюминиевого анода показывает формирование локализованной зоны воздействия без признаков оплавления. Это указывает на мягкий характер плазменно-жидкостного воздействия, обеспечивающего очистку поверхности при сохранении геометрии детали. Количественная оценка изменений шероховатости, смачиваемости и микромеханических свойств требует дальнейшего экспериментального анализа.

С прикладной точки зрения установленные импульсные режимы и наличие двух устойчивых типов горения электрического разряда создают предпосылки для управляемого изменения энерговклада за счёт варьирования параметров струи и электрических характеристик. Это позволяет реализовать переход от режимов мягкой очистки поверхности к контролируемому изменению морфологии поверхности без существенного теплового воздействия на материал, что важно для разработки компактных технологических решений подготовки алюминиевых поверхностей под нанесение покрытий и обеспечение адгезии.

Заключение. Выполнено экспериментальное исследование электрического разряда в системе «струйный электролитический катод — алюминиевый анод» при атмосферном давлении. Установлены две топологии локализации плазмы — контактная зона на тройной линии и область распада струи. В обоих случаях ток носит импульсный характер с амплитудой порядка 0,8 – 1,6 А. Оптическая эмиссионная спектроскопия подтверждает смешанную природу плазмы (воздух + продукты распыления электролита) и доминирование дублета Na I, а оценка по уширению H_α даёт концентрацию электронов $n_e \approx 10^{16}$ см⁻³. Термовизионные данные указывают на максимум эффективной температуры около 47 °С на стороне контакта и вытянутую вдоль струи зону энерговклада длиной около 7 мм. Показано, что механизм запуска импульсов обусловлен электромеханической обратной связью между катодным слоем и гидродинамикой струи. Возможные источники первичных электронов включают вторичную, авто- и фотоэмиссию, а также

эмиссию из газовых микрополостей. Практически это позволяет целенаправленно выбирать режимы (скорость/диаметр струи, электропроводность, напряжение) для деликатной активации, очистки и микротекстурирования алюминиевых поверхностей. Перспективы дальнейших исследований связаны со стандартизацией энергетических метрик, количественной декомпозицией вкладов излучающих компонентов и расширением для построения режимных карт.

Представленные результаты формируют физическую основу для последующего количественного анализа качества поверхности и построения режимных карт плазменно-жидкостной обработки алюминиевых изделий.

Список литературы / References

1. Haixia Wu, Wei Ye, Wang Shen, Quanfa Zhao. Tetracycline Degradation in the System of Peracetic Acid Activation by Liquid Discharge Plasma. *Separation and Purification Technology*. 2025;354(2):128783. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128783>
2. Kovačević VV, Sretenović GB, Obradović BM, Kuraica MM. Low-Temperature Plasmas in Contact with Liquids — A Review of Recent Progress and Challenges. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2022;55(47):473002. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac8a56>
3. Vasilev M, Conlon P, Bohl D, Thagard SM. The Effect of Discharge Frequency of a Gas–Liquid Plasma Reactor on Bulk Liquid Transport and Removal of Organic Contaminants. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2022;42(4):759–783. <https://doi.org/10.1007/s11090-022-10246-2>
4. Srivastava T, Simeni MS, Nayak G Bruggeman PJ. Self-organized Patterns at the Plasma–Liquid Anode Interface in a Helium Glow Discharge: Temporal Development and Mechanisms. *Plasma Sources Science and Technology*. 2022;31(8):085010. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ac83ed>
5. Bruggeman P, Garrick SC, Kushner MJ, Locke BR, Gardeniers JGE, Graham WG, et al. Plasma–Liquid Interactions: A Review and Roadmap. *Plasma Sources Science and Technology*. 2016;25(5):053002. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/25/5/053002>
6. Kashapov N, Kashapov R, Kashapov L. Influence of the Electrolytic Cathode Temperature on the Self-sustaining Mechanism of Plasma-Electrolyte Discharge. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2018;51(49):494003. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aae334>
7. Yutong Yang, Bing Sun, Shaohua Sun, Xiaomei Zhu, Jinglin Liu. Heterogeneous Liquid Discharge Cracking of n-hexadecane as a Heavy Oil Model Compound: A Way to Generate Plasma in Liquid Hydrocarbons at Low Voltage. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2024;177:106348. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106348>
8. Акишев Ю.С., Грушин М.Е., Каральник В.Б., Монич А.Е., Панькин М.В., Трушкин Н.И. и др. Создание неравновесной плазмы в гетерофазных средах газ–жидкость при атмосферном давлении и демонстрация её возможностей для стерилизации. *Физика плазмы*. 2006;32(12):1142–1152. <https://doi.org/10.1134/S1063780X06120087>
9. Akishev YuS, Grushin ME, Karalnik VB, Monich AE, Pan'kin MV, Trushkin NI, et al. Generation of Nonequilibrium Plasma in Heterogeneous Atmospheric-Pressure Gas–Liquid Media and Demonstration of Its Sterilization Ability. *Plasma Physics Reports*. 2006;32(12):1142–1152. <https://doi.org/10.1134/S1063780X06120087>
10. Баринов Ю.А., Школьник С.М. Разряд с жидким неметаллическим катодом (водопроводная вода) в потоке воздуха атмосферного давления. *Журнал технической физики*. 2016;86(11):155–158. <https://doi.org/10.21883/jtf.2016.11.43833.1833>
11. Barinov YuA, Shkolnik SM. Discharge with a Liquid Non-metallic Cathode (Tap Water) in Atmospheric-Pressure Air Flow. *Technical Physics*. 2016;86(11):155–158. <https://doi.org/10.21883/jtf.2016.11.43833.1833>
12. Сироткин Н.А., Титов В.А. Экспериментальное исследование нагрева жидкого катода и переноса его компонентов в газовую фазу под действием разряда постоянного тока. *Прикладная физика*. 2016;(6):25–31.
13. Sirotkin NA, Titov VA. Experimental Study of the Liquid Cathode Heating and Transfer of Its Components to a Gas Phase under Action of a Direct Current Discharge. *Applied Physics*. 2016;(6):25–31.
14. Аверин К.А., Лебедев Ю.А., Шахатов В.А. Некоторые результаты исследования СВЧ-разряда в жидких тяжёлых углеводородах. *Прикладная физика*. 2016;(2):41–45.
15. Averin KA, Lebedev YuA, Shakhmatov VA. Some Results of Studies of a Microwave Discharge in Liquid Heavy Hydrocarbons. *Applied Physics*. 2016;(2):41–45.
16. Гайсин Ал.Ф., Гайсин Ф.М., Желтухин В.С., Сон Э.Е. Высокочастотный разряд со струйным электролитическим электродом. *Физика плазмы*. 2022;48(1):48–54. <https://doi.org/10.1134/S1063780X22010068>
17. Gaisin AIF, Gaisin FM, Zheltukhin VS, Son EE. High-Frequency Discharge with a Jet Electrolytic Electrode. *Plasma Physics Reports*. 2022;48(1):48–54. <https://doi.org/10.1134/S1063780X22010068>
18. Гайсин Ал.Ф., Каюмов Р.Р., Купутдинова А.И., Марданов Р.Р. Плазменно-жидкостной рециклинг металлического порошка для 3D-печати. *Физика и химия обработки материалов*. 2023;(1):37–44. <https://doi.org/10.30791/0015-3214-2023-1-37-44>
19. Gaisin AI, Kayumov R, Kuputdinova A, Mardanov R. Plasma–Liquid Recycling of Metal Powder for 3D Printing. *Physics and Chemistry of Material Treatment*. 2023;(1):37–44. <https://doi.org/10.30791/0015-3214-2023-1-37-44>

14. Петряков С.Ю., Мирханов Д.Н., Гайсин А.Ф., Басыров Р.Ш., Кашапов Н.Ф. Разряд постоянного тока между металлическим анодом и жидким неметаллическим катодом. *Прикладная механика и техническая физика*. 2022;63(5):20–32. <https://doi.org/10.15372/PMTF20220502>

Petryakov SYu, Mirkhanov DN, Gaisin AF, Basyrov RSh, Kashapov NF. DC Discharge between a Metal Anode and a Liquid Non-metallic Cathode. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2022;63(5):20–32. <https://doi.org/10.15372/PMTF20220502>

15. Очкин В.Н. *Спектроскопия низкотемпературной плазмы*. Монография. Москва: Физматлит; 2006. 472 с. Ochkin VN. *Low-Temperature Plasma Spectroscopy*. Moscow: Fizmatlit; 2006. 472 p. (In Russ.)

Об авторах:

Сергей Юрьевич Петряков, ассистент кафедры «Техническая физика» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ» (420111, Российская Федерация, г. Казань, ул. К. Маркса, 10), [SPIN-код](#), serioga_com@mail.ru

Эдуард Рустемович Бельгибаев, ассистент кафедры «Техническая физика» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ» (420111, Российская Федерация, г. Казань, ул. К. Маркса, 10), [SPIN-код](#), erbelgibaev@kai.ru

Алмаз Фивзатович Гайсин, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Техническая физика» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ» (420111, Российская Федерация, г. Казань, ул. К. Маркса, 10), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), almaz87@mail.ru

Рушан Рашитович Каюмов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая физика» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ» (420111, Российская Федерация, г. Казань, ул. К. Маркса, 10), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), rushan_250189033@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

С.Ю. Петряков: написание рукописи — внесение замечаний и исправлений.

Э.Р. Бельгибаев: проведение исследования.

Р.Р. Каюмов: проведение исследования.

А.Ф. Гайсин: научное руководство.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Sergey Yu. Petryakov, Assistant Professor of the Technical Physics Department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI (10, K.Marx Str., Kazan 420111, Russian Federation), [SPIN-code](#), serioga_com@mail.ru

Eduard R. Belgibaev, Assistant Professor of the Technical Physics Department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI (10, K.Marx Str., Kazan 420111, Russian Federation), [SPIN-code](#), erbelgibaev@kai.ru

Almaz F. Gaisin, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Technical Physics Department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI (10, K.Marx Str., Kazan 420111, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), almaz87@mail.ru

Rushan R. Kayumov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Technical Physics Department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI (10, K.Marx Str., Kazan 420111, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), rushan_250189033@mail.ru

Claimed Contributorship:

SYu Petryakov: writing – review & editing.

ER Belgibaev: investigation.

RR Kayumov: investigation.

AF Gaisin: supervision.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 26.02.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 25.03.2026

Принята к публикации / Accepted 01.04.2026