04

Экспериментальное исследование взаимодействия струйного высокочастотного индукционного разряда пониженного давления с поверхностью меди

© Р.Р. Каюмов,[1] И.Ш. Абдуллин,[2] Ал.Ф. Гайсин[1]

[1] Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ, 420111 Казань, Россия
[2] Плазма-ВСТ, 420081Казань, Россия
e-mail: almaz87@mail.ru

Поступило в Редакцию 13 октября 2025 г.
В окончательной редакции 1 декабря 2025 г.
Принято к публикации 3 декабря 2025 г.

Представлены результаты исследования взаимодействия струйного высокочастотного индукционного (ВЧИ) разряда пониженного давления с жидкой плазмообразующей средой с поверхностью медной пластины марки М1. Разряд генерировался в кварцевой трубке со спиралевидным индуктором. Изучены электрофизические характеристики, а также типы и формы плазменных структур, формирующихся в процессе обработки материала. Морфология поверхности образцов исследована до и после обработки; проведены измерения краевого угла смачивания для оценки изменений в поверхностной энергии меди. Термографические измерения позволили установить температурное распределение в зоне горения ВЧИ разряда. Полученные результаты продемонстрировали возможности струйного ВЧИ разряда модификации поверхности меди и открывают перспективы его применения в технологиях упрочнения и защиты металлических материалов.

Ключевые слова: высокочастотный индукционный разряд, плазменно-жидкостные системы, горение разряда, медь.

DOI: 10.61011/JTF.2026.04.62654.289-25

Введение

Низкотемпературная плазма является одним из наиболее универсальных инструментов современной науки и техники. Ее использование охватывает металлургию, машиностроение, аддитивные технологии, микроэлектронику, медицину, экологические процессы и энергетику [1,2]. За последние десятилетия сформировался ряд направлений, связанных с взаимодействием плазмы и жидкостей, получивших название плазменно-жидкостные системы. В них жидкая среда может выполнять сразу несколько функций: служить плазмообразующей фазой, электродом или охлаждающим агентом. Такое сочетание открывает уникальные возможности для генерации химически активных радикалов, переноса заряженных частиц и модификации свойств поверхности материалов [3–8].

Наиболее детально изучены разряды постоянного тока и импульсные разряды в жидких электродах. Эти системы продемонстрировали эффективность в очистке, обеззараживании, активации и упрочнении поверхности металлов [9–15]. Однако существенным ограничением остается эрозия твердых электродов и поступление продуктов их разрушения в плазму, что снижает воспроизводимость и управляемость процессов.

В этой связи все большее внимание исследователей привлекают высокочастотные индукционные (ВЧИ) разряды, возбуждаемые переменным электромагнитным полем. ВЧИ разряд не требует непосредственного контакта электродов с плазмой, обеспечивая бесконтактный ввод энергии в систему и исключая электродный износ. Ключевые преимущества ВЧИ разрядов заключаются в высокой стабильности, возможности работы в широком диапазоне давлений и составах сред, а также в формировании объемной плазмы с высокой концентрацией заряженных частиц [16].

Особый интерес представляют струйные конфигурации ВЧИ разрядов пониженного давления, когда жидкость подается в рабочую камеру в виде тонкой струи. Такая геометрия обладает рядом уникальных свойств:

- формирование направленного плазменного потока,
- возможность локализации зоны теплового воздействия,
- регулирование параметров плазмы за счет гидродинамики струи (скорости, расхода, диаметра),
- упрощение управления составом плазмы за счет варьирования состава электролита.

Несмотря на то что классические объемные ВЧИ разряды в газах достаточно подробно исследованы [16], систематические работы по струйным ВЧИ разрядам с жидкой плазмообразующей средой практически

отсутствуют. Лишь отдельные публикации последних лет [17–19] затрагивают вопросы постановочных экспериментов и демонстрируют возможность возбуждения разряда в проточных конфигурациях. В то же время механизмы формирования плазмы, ее устойчивость и влияние на металлические материалы в таких условиях изучены явно недостаточно.

С научной точки зрения струйный ВЧИ разряд интересен как пример неравновесной плазмы в условиях пониженного давления, где одновременно протекают электрофизические, гидродинамические и теплофизические процессы. Здесь возникает уникальное сочетание факторов: высокая частота электромагнитного поля, малое давление, узкая струйная геометрия и наличие жидкой плазмообразующей среды. Такое сочетание формирует богатую физико-химическую картину, в которой взаимодействие плазмы с поверхностью может существенно отличаться от известных режимов дуговых или тлеющих разрядов.

С практической точки зрения актуальность исследования определяется потребностью в новых методах обработки меди и ее сплавов. Медь (марка М1) широко используется в электротехнической промышленности, электронике, энергетике и машиностроении благодаря высокой теплопроводности, электропроводности и пластичности. Однако медь склонна к окислению и коррозии, ее поверхность подвержена износу, а механические свойства ограничивают долговечность изделий. При этом использование струйного ВЧИ разряда позволяет локализованно воздействовать на поверхность, избегая значительного перегрева, что особенно важно для меди с ее высокой теплопроводностью.

Исследование взаимодействия струйного ВЧИ разряда пониженного давления с жидкой плазмообразующей средой и поверхностью меди представляет собой актуальную задачу, находящуюся на стыке фундаментальной плазмофизики и прикладного материаловедения. Оно позволит:

- расширить представления о механизмах формирования струйных плазменных структур,
- изучить влияние разряда на морфологию и физико-механические свойства меди,
- оценить изменения смачиваемости после обработки,

Целью настоящей работы является комплексное экспериментальное исследование струйного ВЧИ разряда пониженного давления с жидкой плазмообразующей средой и его воздействия на поверхность медных образцов марки М1, включая анализ электрофизических параметров разряда, морфологии поверхности и краевого угла смачивания.

1. Экспериментальная установка

Для зажигания и поддержания струйного ВЧИ разряда пониженного давления создана экспериментальная установка с рабочей камерой, принципиальная схема которой представлена на рис. 1.

В качестве источника энергии использовался высокочастотный генератор УГПН-1. Питание осуществлялось от трехфазной сети напряжением 380 V, 50 Hz (допустимое отклонение $\pm 5\,\%$). Номинальная колебательная мощность составляла 5 kW, при этом выходная мощность на рабочей частоте 1.76 MHz достигала не менее 4 kW. КПД генератора не ниже 50 %, полный КПД установки составлял порядка 30 %. Анодное напряжение регулировалось в пределах 8–9.5 kV при токе 0.2–1.5 A; сеточный ток не превышал 1.5 A. Для охлаждения генератора применялась проточная водяная система (расход не менее $0.2\,\mathrm{m}^3/\mathrm{h}$ при давлении $(1.5 \pm 0.2)\,\mathrm{kgf/cm}^2$).

На кварцевую трубку наворачивалась медная полоса шириной 7 mm и толщиной 0.2 mm, которая совпадает с наружным диаметром кварцевой трубки, которая образует трехвитковый соленоид. Концы трехвиткового соленоида подключались к ВЧ генератору.

Для обеспечения воспроизводимости параметров ВЧИ разряда использовалась замкнутая система циркуляции электролита с термостатированной ванной. Поддержание температуры раствора осуществлялось с помощью термостата, а охлаждение — с использованием рефрижераторного охладителя, что позволило стабилизировать тепловой режим эксперимента. Обновление состава среды происходило за счет подачи и откачки раствора; в контуре дополнительно установлен фильтр грубой очистки.

Создание диапазона рабочих давлений обеспечивалось насосом 2НВР-5ДМ, обладающим предельным давлением $6.7 \cdot 10^{-2}$ Pa и производительностью по воздуху 5 L/s. Контроль остаточного давления проводился вакуумметром, регулировка — дозирующим клапаном, что обеспечивало стабильность параметров во время эксперимента.

Давление измерялось с помощью вакуумметра марки ОБВ1-100.

Для анализа применялся комплекс современных диагностических методов:

1. Высокоскоростная видеосъемка. Динамика формирования плазмы и развитие плазменных структур регистрировались камерой Casio EX-F1 с частотой 600–1200 fps. Такой диапазон позволял фиксировать быстро протекающие нестационарные процессы, включая пульсации микроразрядов и перемещение светящихся структур вдоль струи. Полученные последовательности кадров обрабатывались в программных комплексах HX Link и Movavi Video Editor 14 Plus, что обеспечивало возможность построения покадровых траекторий и количественного анализа частоты пульсаций. Дополнительно морфология плазменных образований на поверхности меди исследовалась с использованием оптического микроскопа СП-52, позволяющего оценивать локальные зоны взаимодействия плазмы с твердым телом.

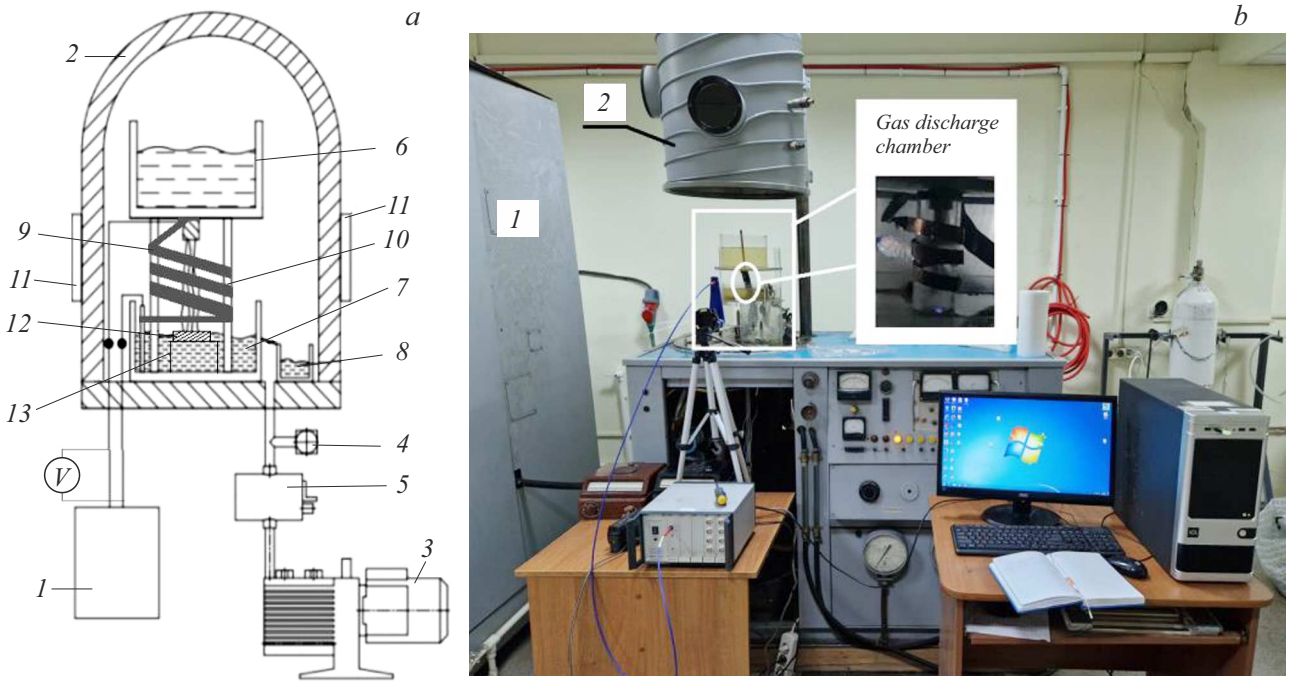


Рис. 1. Функциональная схема (*a*) и фотография (*b*) экспериментальной установки для зажигания струйного ВЧИ разряда пониженного давления с жидкой плазмообразующей средой: *1* — высокочастотный источник питания; *2* – вакуумная камера; *3* — пластинчато-роторный насос 2НВР-5ДМ; *4* — вакуумметр; *5* — клапан регулировки давления; *6* — электролитическая ячейка подачи струи электролита; *7* — основная электролитическая ячейка для стока; *8* — дополнительная электролитическая ячейка для стока; *9* — кварцевая камера, на поверхность которой наворачивалась медная полоса шириной 7 mm, которая совпадает с наружным диаметром кварцевой трубки и образует трехвитковый соленоид; *10* — спиралевидный индуктор, *11* — смотровые окна; *12* — обрабатываемая деталь; *13* — подставка для обрабатываемой детали.

2. Электрические измерения. Напряжение измерялось электростатическим вольтметром С95, который подключался параллельно. Ток измерялся поясом Роговоского.

3. Для оценки теплового воздействия на элементы установки и исследуемые образцы использовался метод инфракрасной термографии. Измерения проводились тепловизором Testo 875 при коэффициенте излучения $\varepsilon = 0.95$ (типичное значение для кварца) и отраженной температуре 20 °C. Термографические данные позволили построить карты температурного распределения на внешней поверхности сред.

4. Микроструктурные исследования. Морфология поверхности меди до и после обработки анализировалась методом конфокальной лазерной сканирующей микроскопии (Olympus LEXT OLS4100). Этот метод обеспечивал получение трехмерных изображений поверхности с высоким пространственным разрешением, измерение параметров шероховатости (средняя шероховатость R_a и a — максимальная высота неровностей R_z) и выявление характерных следов плазменного воздействия, включая микроплавления, дефекты и разрядные каналы. Сравнительный анализ позволял установить корреляцию между условиями разряда и изменением микрорельефа поверхности.

5. Смачиваемость. Для оценки изменений в поверхностной энергии меди определялся статистический краевой угол смачивания методом лежащей капли. Гистерезис не измерялся. Данный параметр является чувствительным индикатором модификации химического состояния поверхности и наличия оксидных пленок. Краевой угол рассматривается как индикатор изменения поверхностной энергии и смачиваемости. Уменьшение угла трактуем как рост гидрофильности и потенциального сцепления полярных жидких систем (клеи, лаки, флюсы) с медной поверхностью [20,21], а увеличение — как гидрофобизацию. В настоящей работе под адгезией понимается сцепление внешних жидких систем с медной поверхностью, а не прочность оксидной пленки к меди.

Параметры струйного ВЧИ разряда с жидкой плазмообразующей средой в процессе струйной обработки поверхности медной пластины марки М1 (длина 10 mm, ширина 10 mm) представлены в таблице.

Длина струи электролита составляла 35 mm при диаметре 1.5 mm. Скорость струи $v_c = 0.78$ m/s и расход $Q = 1.5$ mL/s обеспечивали стабильное формирование потока струи жидкости с ВЧИ разрядом. Давление в рабочей камере составляло 10 000 Pa. Электрические параметры: анодный ток $I_a = 0.25$ A, сеточный ток $I_c = 0.4-0.6$ A, напряжение $U_p = 0.56-0.83$ kV, ток разряда $I_p = 0.8-1.35$ A. В качестве плазмообразующей среды использовался 3 % раствор $(NH_4)_2SO_4$ в очищенной технической воде. Индуктор представлял собой спи-

Параметры струйного ВЧИ разряда в процессе взаимодействия с медным образцом

№	Параметр	Значение
1	Длина струи l_c, mm	35
2	Диаметр струи d_c, mm	1.5
3	Скорость струи v_c, m/s	0.89
4	Расход электролита Q, mL/s	1.57
5	Давление P, Pa	10 000
6	Ток анодный I_a, A	0.25
7	Ток сеточный I_c, A	0.4–0.6
8	Напряжение разряда U_p, kV	0.56–0.83
9	Ток разряда I_p, A	0.8–1.35

ральное медное кольцо, установленное вокруг кварцевой трубки диаметром 22.3 mm.

2. Результаты и их обсуждение

В проведенных экспериментах установлено, что горение струйного ВЧИ разряда пониженного давления с жидкой плазмообразующей средой при давлении 10 000 Pa имеет филаментно-струйный характер и может реализовываться в нескольких режимах, зависящих от электрических параметров и гидродинамических условий (рис. 2, *a*).

На начальных стадиях зажигания наблюдался микроразрядный режим, проявлявшийся в виде серии короткоживущих светящихся каналов, локализованных преимущественно в областях сужения и возмущений поверхности струи. Эти микроразряды отличались пульсирующим характером горения и нестабильной динамикой: отдельные каналы возникали и исчезали с высокой частотой, что приводило к мерцающему свечению и сильной пространственно-временной неустойчивости плазмы.

При увеличении тока и мощности разряда система переходила в более устойчивый филаментно-непрерывный режим (рис. 2, *b*). В этих условиях вдоль оси струи формировался пучок устойчивых плазменных филаментов, равномерно распределенных по длине канала. Свечение приобретало однородный характер, наблюдалась высокая воспроизводимость формы разряда, что указывало на преобладание индуктивного подвода энергии над паразитной емкостной накачкой. Переход в данный режим сопровождался стабилизацией электрических параметров и уменьшением флуктуаций амплитуды тока и напряжения.

При дальнейшем усилении энерговклада и развитии гидродинамических возмущений струи наблюдался квазиконусный режим горения (рис. 2, *c*). Он характеризовался общей засветкой ядра струи и ярко выраженной локализацией излучения в приповерхностной зоне медного образца. В этих условиях плазма приобретала усеченную конусообразную форму, а по периферии наблюдалась развитая филаментация. Данный режим сопровождался более интенсивным тепломассопереносом и кипением электролита, что усиливало взаимодействие плазмы с поверхностью меди и формировало сложные динамические структуры, включающие как устойчивое свечение в центральной части, так и пульсирующие филаменты на границах плазменного канала.

Формирование филаментов определялось совокупным действием электромагнитного поля и гидродинамики струи. Для струи диаметром 1.5 mm при скорости 0.8–0.9 m/s число Рэйнольдса составляло порядка 10^3, что соответствует режиму ламинарного течения с поверхностными возмущениями. Эти возмущения создавали локальные неоднородности плотности и электрической проводимости, на которых инициировались микроразряды. В дальнейшем накопление энергии в каналах и локальный джоулев нагрев приводили к развитию устойчивых филаментов, которые стабилизировались при достижении баланса между индуктивным подводом энергии, конвективным охлаждением жидкой струей, процессами испарения и частичного кипения электролита, а также радиационными потерями.

Расчетные оценки электрофизических параметров показывают, что при поперечном сечении струи площадью порядка $1.77 \cdot 10^{-5}\,\mathrm{m}^2$ плотность тока достигала $4.5 \cdot 10^5 - 7.6 \cdot 10^5\,\mathrm{A/m}^2$ $(453-764\,\mathrm{kA/m}^2)$. Соответствующая удельная мощность по сечению струи составляла $2.5 \cdot 10^8 - 6.3 \cdot 10^8\,\mathrm{W/m}^2$. Эти значения указывают на исключительно высокую концентрацию энергии в плазменном канале, что объясняет локализованный характер теплового воздействия на поверхность медного образца. При этом внешние элементы установки нагревались умеренно, что подтверждается данными инфракрасной термографии: распределение температур на кварцевой трубке и индукторе оставалось относительно равномерным, а перегрев отсутствовал. Это свидетельствует о том, что основная часть энергии расходуется непосредственно в объеме плазмы и на взаимодействие с поверхностью меди, а не на тепловые потери в конструкцию установки.

Струйный ВЧИ разряд при пониженном давлении обладает многостадийным характером горения, где наблюдается последовательный переход от пульсирующих микроразрядов к устойчивым филаментам и далее к конусообразным динамическим структурам. В основе формирования этих режимов лежит сложное сочетание индуктивного подвода энергии, гидродинамических особенностей струи и процессов тепломассопереноса. Высокая энергетическая концентрация в плазменном канале определяет эффективность взаимодействия с медной поверхностью и является ключевым фактором модификации ее физико-химических свойств.

С ростом устойчивости горения от микроразрядного к филаментному и квазиконусному режимам эффективное

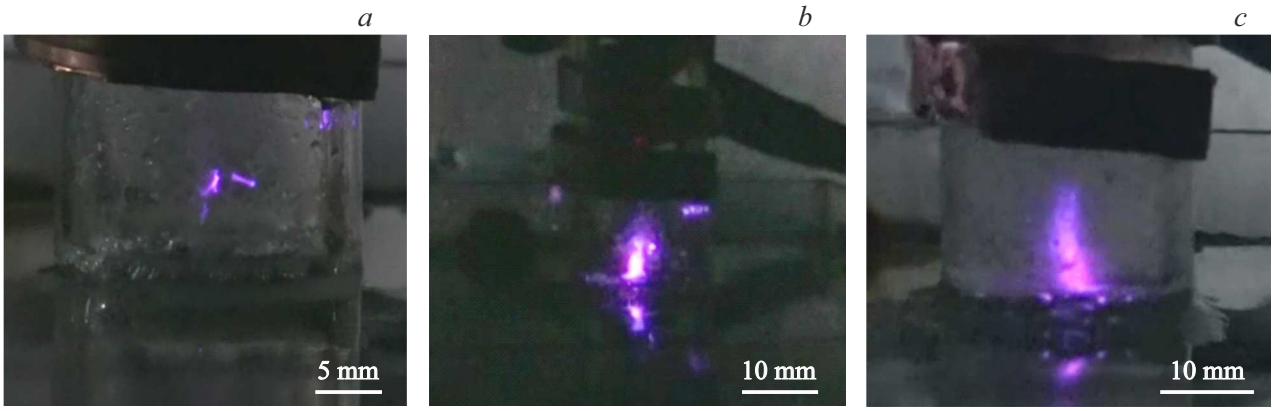


Рис. 2. Фотографии струйного ВЧИ разряда с жидкой плазмообразующей средой при $p = 10^4$ Pa; *a* — $U_p = 0.56$ V, $I_p = 0.8$ A; *b* — $U_p = 0.7$ V, $I_p = 1.1$ A; *c* — $U_p = 0.8$ V, $I_p = 1.3$ A.

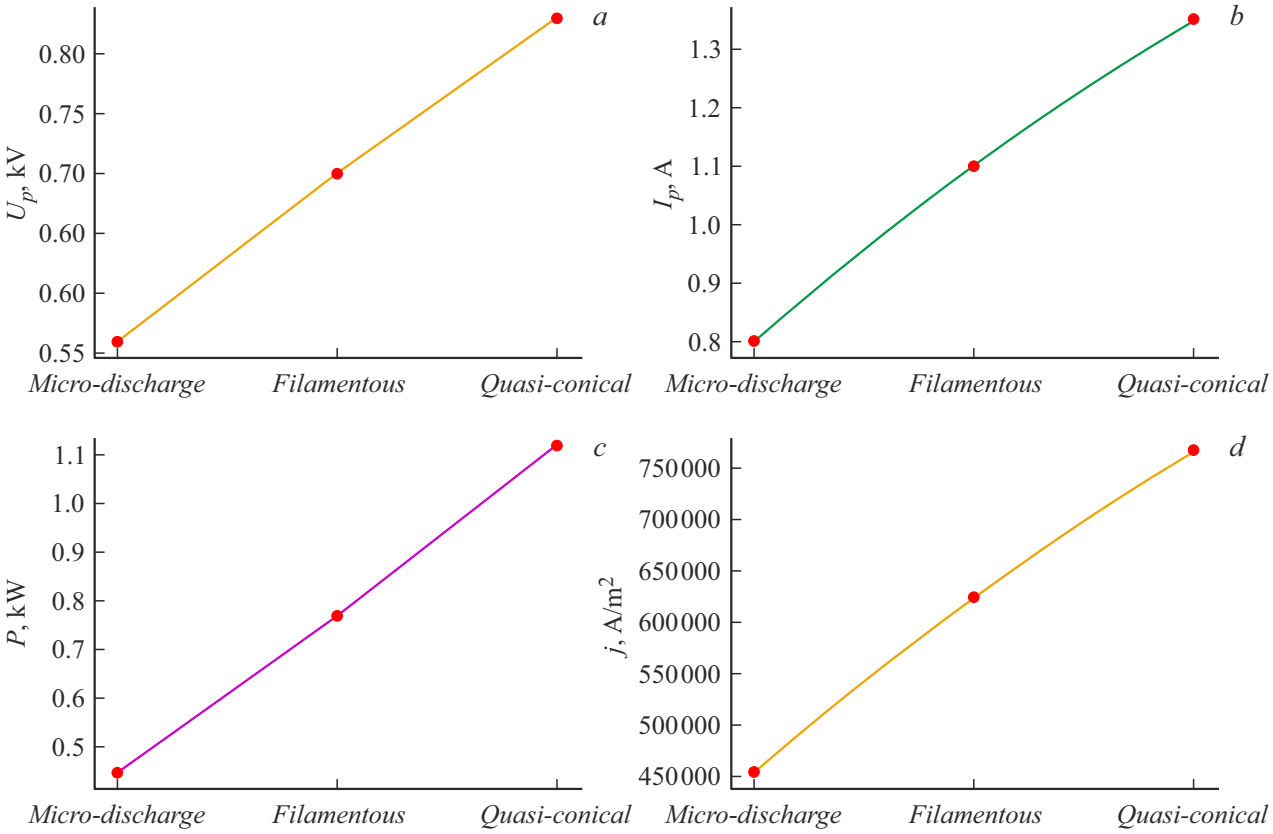


Рис. 3. Зависимости: *a* — напряжения разряда U_p от режима горения струйного ВЧИ разряда (микроразрядный → филаментный → квазиконусный); *b* — тока разряда I_p от режима горения струйного ВЧИ разряда; *c* — мощности разряда P при переходе от микроразрядного к филаментному и квазиконусному режимам; *d* — плотности тока j в сечении струи от режима горения ВЧИ разряда.

напряжение на активной длине увеличивалось с 0.56 до 0.83 kV (рис. 3, *a*).

Это отражает переход к более проводящей плазме, где для поддержания объемной ионизации требуется больший энерговклад. Усиление индуктивного вклада (H-режима) сопровождается уменьшением роли паразитной емкостной составляющей и стабилизацией филаментов.

Рост тока от 0.80 до 1.35 A указывает на увеличение проводимости плазменного канала и сужение эффективной площади токонесущих областей (рис. 3, *b*). Такая динамика свидетельствует о подавлении пульсаций емкостной накачки и переходе к устойчивому филаментному горению, сопровождающемуся формированием стабильного пучка плазменных каналов.

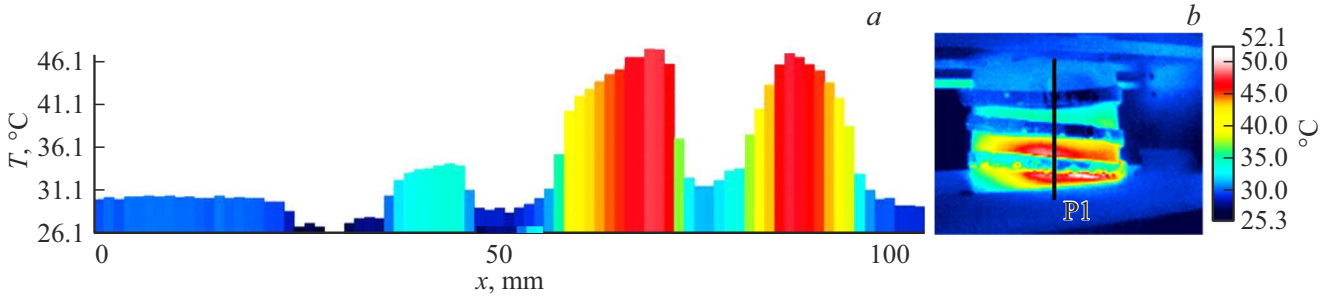


Рис. 4. Распределение температуры (a) вдоль черной линии на поверхности кварцевой трубки и индуктора (b) и термограмма кварцевой трубки и индуктора (b) в условиях горения струйного ВЧИ разряда пониженного давления с жидкой плазмообразующей средой.

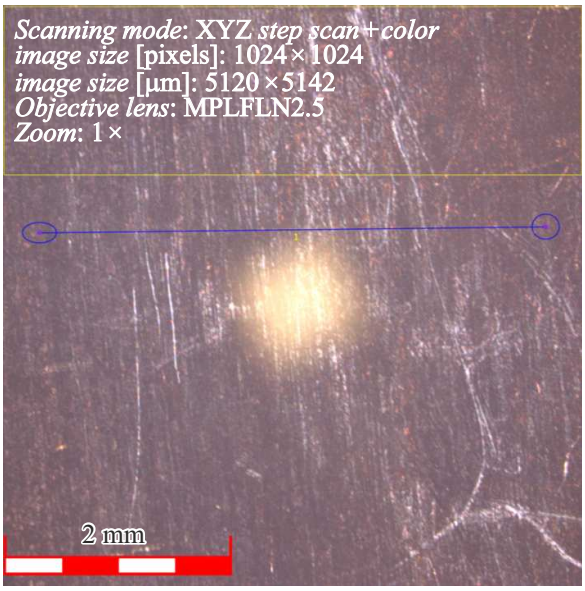


Рис. 5. Фотография поверхности медной пластины с локальной зоной, обработанной струйным ВЧИ разрядом пониженного давления.

Интегральная мощность возрастала от 0.45 до 1.12 kW (рис. 3, c). Наблюдаемый рост мощности прямо коррелировал с изменением морфологии разряда: от пульсирующих микроразрядов через устойчивые филаменты к квазиконусному факелу, привязанному к поверхности меди. Таким образом, переход к более интенсивным режимам сопровождался увеличением энерговклада в плазму.

При диаметре струи 1.5 mm и токах 0.8–1.35 A плотность тока достигала $4.5 \cdot 10^5$–$7.6 \cdot 10^5$ A/m^2 (рис. 3, d). Такие значения характерны для сжатых плазменных каналов и обеспечивают высокую концентрацию энергии на ограниченной площади. Именно это объясняет локальный характер теплового воздействия на поверхность меди при отсутствии значительного перегрева элементов установки.

Результаты термографических исследований показали наличие выраженной неоднородности температур в разрядной камере (рис. 4, a).

Максимальная температура, зафиксированная на поверхности кварцевой трубки вблизи горения ВЧИ разряда, составила 47.6 °C (320.75 K). Минимальные значения температуры наблюдались на поверхности медного индуктора — 26.2 °C (299.35 K), что связано с его эффективным охлаждением конвекцией окружающего воздуха и тепловым барьером в виде вакуумной прослойки. Средняя температура вдоль исследуемого участка на поверхности кварцевой трубки с индуктором (рис. 4, b) составила 34.1 °C (307.25 K).

Перепад температур между наиболее нагретой зоной и относительно холодными элементами установки достигал $\sim$ 21 °C, что свидетельствует о высокой эффективности отвода тепла. Основная часть тепловой энергии уносилась циркулирующим электролитом, проходящим через зону взаимодействия, а также рассеивалась за счет отвода в медь и излучения плазмы. Дополнительный вклад в ограничение нагрева конструкционных элементов вносило пониженное давление, уменьшающее роль конвективного теплообмена между плазмой и стенками кварцевой трубки.

Важно подчеркнуть, что температура поверхности индуктора (26.2 °C) практически совпадала с температурой окружающей среды. Это означает, что подводимая энергия ВЧ генератора расходуется преимущественно на поддержание плазменного факела, нагрев и частичное испарение электролита, а также на процессы ионизации и диссоциации, а не на бесполезный нагрев элементов конструкции.

Тепловизионный контроль подтвердил, что при высоких температурах в зоне взаимодействия струи с поверхностью меди внешние элементы установки нагреваются незначительно. Максимальная температура на поверхности камеры не превышала 48 °C, что указывает на эффективный тепловой режим работы системы и безопасность ее эксплуатации.

На рис. 5 представлена фотография медной пластины после обработки: в ее центре видно светлое пятно

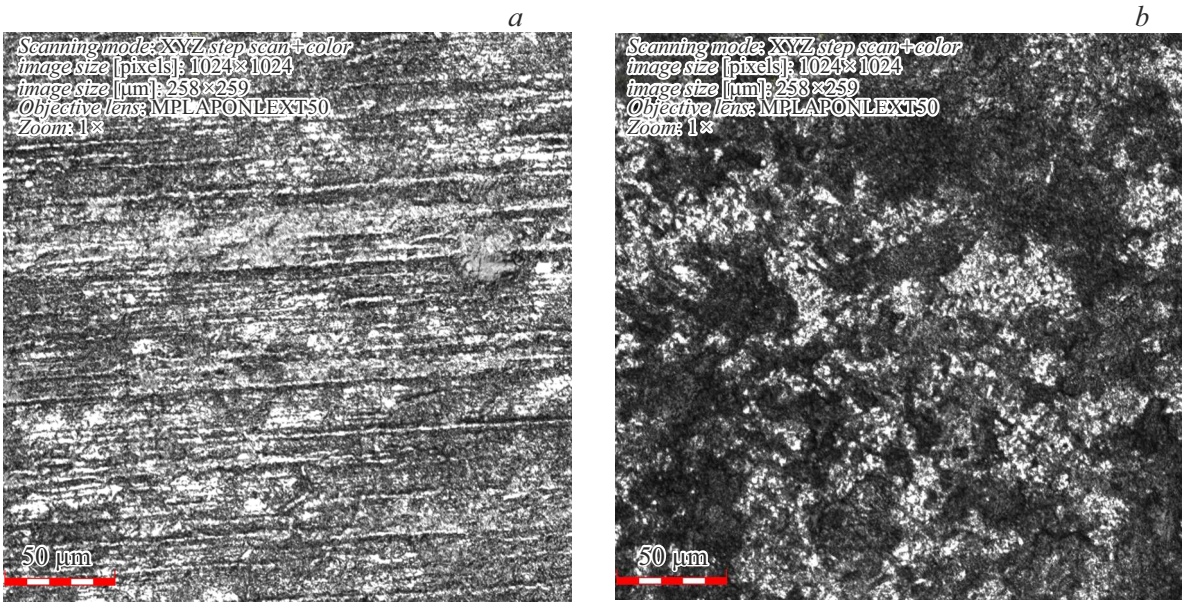


Рис. 6. СЭМ изображение морфологии поверхности меди: a — до обработки, b — после обработки.

округлой формы — зона воздействия струйного ВЧИ разряда.

Осветление объясняется изменением топографии и химического состава поверхности: удалением адсорбированных загрязнений и перераспределением окисных слоев, что влияет на отражательную способность металла.

На рис. 6, a показано СЭМ изображение морфологии поверхности меди до обработки. Поверхность покрыта параллельными царапинами, формирующими характерные углубления и выступы. По результатам измерений параметров шероховатости: $R_a = 0.746\,\mu$m, $R_z = 2.992\,\mu$m. Согласно табличным значениям классов шероховатости по ГОСТ 2789-73/ГОСТ 2789-59, такое сочетание параметров соответствует ориентировочно классу 5–6 ($R_a \approx 0.63-1.6\,\mu$m, $R_z \approx 2.5-5\,\mu$m).

После воздействия ВЧИ разряда поверхность значительно выровнялась (рис. 6, b). Крупные дефекты и царапины сглажены, и измерения показали $R_a = 0.166\,\mu$m и $R_z = 0.822\,\mu$m. Эти значения уже попадают в диапазон класса 8–9 ($R_a \approx 0.16-0.25\,\mu$m, $R_z \approx 0.8-1.6\,\mu$m).

Снижение параметров шероховатости почти в пять раз по R_a и в ~ 3.6 раза по R_z свидетельствует о значительном выравнивании рельефа. Причинами такого эффекта могут быть локальное плавление и переплавка микрорельефа и ионная бомбардировка. Воздействие струйного ВЧИ разряда сместило поверхность меди из класса $\sim 5-6$ в область классов $\sim 8-9$ по ГОСТ, что существенно улучшает физико-механические свойства поверхности, уменьшает микроконтакты, может влиять на сцепление покрытий (направление эффекта зависит от системы „покрытие-медь“ и режимов обработки), снижает склонность к коррозии.

Для оценки влияния струйного ВЧИ разряда пониженного давления на физико-химические свойства меди проведено исследование краевого угла смачивания дистиллированной водой. Данный параметр является чувствительным индикатором состояния поверхности, так как зависит от ее морфологии, химического состава и наличия окисных или органических пленок.

До обработки медная поверхность характеризовалась углом смачивания 68°, что соответствует умеренно гидрофильному состоянию (рис. 7, a). Такое значение связано с наличием естественных окисных слоев, образующихся при контакте меди с атмосферой, а также с выраженной микрошероховатостью поверхности, которая усиливает капиллярный эффект и способствует растеканию капли по поверхности. Механические следы обработки в виде параллельных царапин дополнительно создавали каналы, по которым жидкость могла распространяться, увеличивая эффективное смачивание.

После воздействия плазменного разряда угол смачивания увеличился до 80.2°, что указывает на снижение гидрофильности и переход поверхности к более гидрофобному состоянию (рис. 7, b). Данный эффект объясняется сочетанием нескольких факторов. Во-первых, существенное сглаживание рельефа: параметры шероховатости снизились с $R_a = 0.746\,\mu$m и $R_z = 2.992\,\mu$m до $R_a = 0.166\,\mu$m и $R_z = 0.822\,\mu$m, что уменьшает площадь фактического контакта жидкости с поверхностью и ограничивает капиллярное растекание. Во-вторых, плазменное воздействие приводит к модификации химического состояния меди: формированию новых оксидных структур, перераспределению кислорода и меди на поверхности, что изменяет ее поверхностную энергию. Вклад вносит и локальное тепловое воздействие разряда, которое способствует частичной рекристаллизации и уплотнению поверхностного слоя.

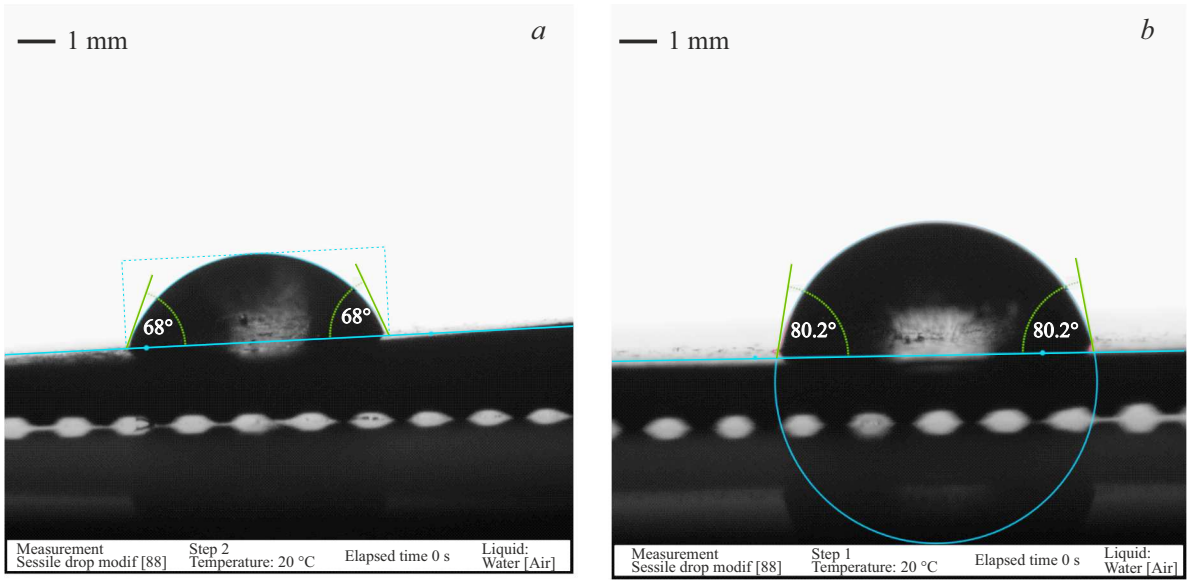


Рис. 7. Краевой угла смачивания поверхности меди: *a* — до обработки, *b* — после обработки.

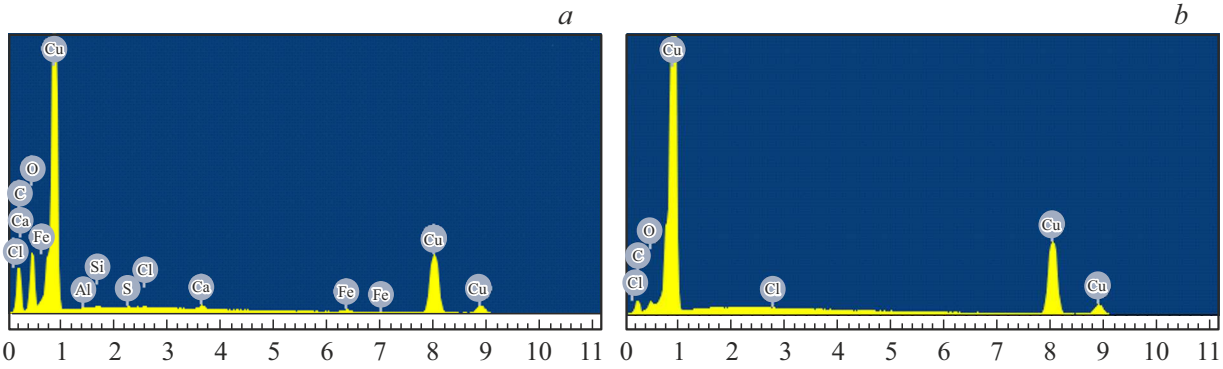


Рис. 8. Элементный состав поверхности образца: *a* — до обработки, *b* — после обработки.

Наблюдаемое увеличение угла смачивания от 68 до 80.2° указывает на снижение смачиваемости водой. Выводы о прочности сцепления покрытий не делались и требуют отдельных механических испытаний. В настоящей работе фиксировалась контролируемая модификация смачиваемости. До обработки поверхность обладала выраженной склонностью к растеканию жидкости, после обработки она демонстрирует более высокую устойчивость к растеканию жидкости. Данный эффект связан с уменьшением шероховатости и изменением химического состава поверхностного слоя (рис. 8). Также этот эффект может иметь важное прикладное значение: повышенная гидрофобность способствует снижению скорости коррозии в агрессивных средах, уменьшает вероятность образования гальванических ячеек в присутствии влаги и может использоваться для улучшения эксплуатационных характеристик медных деталей. Вместе с изменением морфологии и уменьшением шероховатости модификация угла смачивания подтверждает, что воздействие струйного ВЧИ разряда является эффективным инструментом управления физико-химическими свойствами поверхности меди, открывая возможности ее целенаправленной функционализации для различных технических приложений.

Заключение

1. Экспериментально исследован процесс взаимодействия струйного ВЧИ разряда пониженного давления с поверхностью медной пластины марки М1. Установлено, что горение разряда носит филаментно-струйный характер и может реализовываться в микроразрядном, филаментном и квазиконусном режимах.

2. Определены электрофизические характеристики разряда: напряжение $U_p = 0.56-0.83$ V, ток $I_p = 0.8-1.35$ A, плотность тока $j = 4.5 \cdot 10^5 - 7.6 \cdot 10^5$ A/m^2. Показано, что рост тока и плотности тока коррелируют с переходом

от пульсирующего микроразрядного к устойчивому филаментному режиму.

3. Тепловизионные измерения показали, что максимум температуры кварцевой трубки, ограничивающей зону горения ВЧИ разряда, составляет 47.6 °C, в то время как температура индуктора не превышает 26.2 °C.

4. Морфологический анализ выявил существенное сглаживание рельефа: средняя шероховатость уменьшилась с $R_a = 0.746$ до $0.166\,\mu$m, а максимальная высота неровностей — с $R_z = 2.992$ до $0.822\,\mu$m. Поверхность меди перешла из диапазона классов шероховатости 5–6 в область классов 8–9 по ГОСТ 2789-73.

5. Измерение краевого угла смачивания показало его рост с 68 до 80.2°, что свидетельствует о снижении гидрофильности и повышении гидрофобности обработанной поверхности. Данный эффект связан с уменьшением шероховатости и изменением химического состава поверхностного слоя.

Финансирование работы

Работы выполнены за счет гранта Академии наук Республики Татарстан представленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторских диссертаций, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан „Научно-технологическое развитие Республики Татарстан“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] P.J. Bruggeman, A. Bogaerts, J.M. Pouvesle, E. Robert, E.J. Szili. J. Appl. Phys., **130** (20), 200401 (2021). DOI: 10.1063/5.0078076

[2] Y.P. Raizer, J.E. Allen, V.I. Kisin. *Gas Discharge Physics* (Springer, Berlin, 1997), p. 449.

[3] N.F. Kashapov, R.N. Kashapov, L.N. Kashapov, J. Phys. D: Appl. Phys., **51** (49), 494003 (2018). DOI: 10.1088/1361-6463/aae334

[4] D.T. Elg, H.E. Delgado, D.C. Martin, R.M. Sankaran, P. Rumbach, D.M. Bartels, D.B. Go. Spectrochim. Acta Part B: Atomic Spectroscopy, **186**, 106307 (2021). DOI: 10.1016/j.sab.2021.106307

[5] Ал.Ф. Гайсин, Н.Ф. Кашапов, А.И. Купутдинова, Р.А. Мухаметов. ЖТФ, **88** (5), 717 (2008). DOI: 10.21883/JTF.2018.05.45900.2485 [A.F. Gaisin, N.F. Kashapov, A.I. Kuputdinova, R.A. Mukhametov. Tech. Phys., **63** (5), 695 (2018). DOI: 10.1134/S1063784218050080

[6] А.В. Хлюстова. Письма в ЖТФ, **47** (19), 38 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.19.51512.18882 [A.V. Khlyustova. Tech. Phys. Lett., **48** (13), 51 (2022). DOI: 10.21883/TPL.2022.13.53568.18882]

[7] P. Andre, Y. Barinov, G. Faure, V. Kaplan, A. Lefort, S. Shkol'nik, D. Vacher. J. Phys. D: Appl. Phys., **34** (20), 3456 (2001). DOI: 10.1088/0022-3727/34/24/306

[8] V.A. Panov, L.M. Vasilyak, S.P. Vetchinin, V.Y. Pecherkin, A.S. Saveliev. Plasma Phys. Reports, **44**, 882 (2018). DOI: 10.1134/S1063780X1809009X

[9] D.L. Kirko. Plasma Phys. Reports, **46**, 597 (2020). DOI: 10.1134/S1063780X20060045

[10] L.N. Bagautdinova, S.C. Mastyukov, F.M. Gaysin, I.T. Fakhrutdinova, M.A. Leushka, A.F. Gaysin, R.S. Sadriev. High Temperature, **57**, 944 (2019). DOI: 10.1134/S0018151X19060051

[11] E.I. Meletis, X. Nie, F.L. Wang, J.C. Jiang. Surf. Coat. Technol., **150**, 246 (2002). DOI: 10.1016/S0257-8972(01)01521-3

[12] T. Ishijima, K. Nosaka, Y. Tanaka, Y. Uesugi, Y. Goto, H. Horibe. Appl. Phys. Lett., **103**, 142101 (2013). DOI: 10.1063/1.4823530

[13] Al.F. Gaysin. Inorganic Mater.: Appl. Research, **8**, 392 (2017). DOI: 10.1134/S207511331703008X

[14] A.F. Gaysin, A.K. Gil'mutdinov, D.N. Mirkhanov. Metal Sci. Heat Treatment, **60**, 128 (2018). DOI: 10.1007/s11041-018-0250-1

[15] E.E. Son, I.F. Suvorov, S.V. Kakurov, T.L. Solov'Eva, A.S. Yudin, T.V. Rakhletsova, Al.F. Gaisin, G.T. Samitova. High Temperature, **52**, 490 (2014). DOI: 10.1134/S0018151X14040208

[16] Y.P. Raizer, M.N. Shneider, N.A. Yatsenko. Radio-Frequency Capacitive Discharges (CRC Press, London, 1995), p. 304. DOI: 10.1201/9780203741337

[17] Y. Sakiyama, D.B. Graves, H.-W. Chang, T. Shimizu, G.E. Morfill. J. Phys. D: Appl. Phys., 45, 425201 (2012).

[18] A.F. Gaisin, F.M. Gaisin, V.S. Zheltukhin, E.E. Son. Plasma Phys. Reports, 48, 48 (2022). DOI: 10.1134/S1063780X22010068

[19] В.С. Желтухин, Ал.Ф. Гайсин, С.Ю. Петряков. Письма в ЖТФ, **48** (17), 24 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.17.53283.19237 [V.S. Zheltukhin, Al.F. Gaisin, S.Y. Petryakov. Tech. Phys. Lett., **48** (9), 22 (2022). DOI: 10.21883/TPL.2022.09.55076.19237]

[20] J.N. Borges, T. Belmonte, J. Guillot, D. Duday, M. Moreno-Couranjou, P. Choquet, H.N. Migeon. Plasma Processes Polymers, **6** (S1), S490 (2009). DOI: 10.1002/ppap.200931106.

[21] H.K. Yun, K. Cho, J.H. An, C.E. Park. J. Mater. Sci., **27** (21), 5811 (1992). DOI: 10.1007/BF01119743