УДК 537.528

РАЗРЯД ПОСТОЯННОГО ТОКА МЕЖДУ МЕТАЛЛИЧЕСКИМ АНОДОМ И ЖИДКИМ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИМ КАТОДОМ

С. Ю. Петряков, Д. Н. Мирханов, Ал. Ф. Гайсин*, Р. Ш. Басыров, Н. Ф. Кашапов**

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева (КАИ), 420111 Казань, Россия
* Объединенный институт высоких температур РАН, 125412 Москва, Россия
** Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008 Казань, Россия
E-mails: serioga_com@mail.ru, mirhanov@list.ru, almaz87@mail.ru, rafikbasyrov@mail.ru, kashnail@gmail.com

Проведены исследование характеристик и математическое моделирование поведения низкотемпературной плазмы электрического разряда постоянного тока, зажигаемого между алюминиевым анодом и электролитическим катодом (3 %-й раствор NaCl в очищенной воде) при атмосферном давлении. Зажигание разряда осуществляется при погружении металлического анода в электролитический катод. Рассмотрены типы и формы генерируемых в межэлектродном промежутке плазменных структур. Представлены результаты высокоскоростной съемки процессов пробоя и горения разряда. Исследованы электрофизические параметры разряда, в том числе пульсации, колебания силы тока и напряжения. С помощью метода эмиссионной спектроскопии определены спектр излучения разряда, состав плазмы, концентрация электронов и температура тяжелых компонентов плазмы. Рассмотрены термограммы поверхности жидкого неметаллического и металлического электродов в зоне горения разряда. Представлены результаты численного моделирования напряженности электрического поля и начальной стадии разряда.

Ключевые слова: низкотемпературная плазма, электрический разряд, плазменно-жидкостные системы, численные методы.

DOI: 10.15372/PMTF20220502

Введение. Изучение низкотемпературной плазмы разрядов с жидкими неметаллическими электродами представляет собой быстроразвивающуюся междисциплинарную область исследований [1]. В плазменно-жидкостных системах разряды генерируются постоянным или переменным током в межэлектродном пространстве, при этом в качестве одного из электродов применяется жидкость. В качестве жидкого электрода, как правило, используются растворы солей различной концентрации в дистиллированной, технической или очищенной воде. Зажигание разряда осуществляется в газоразрядных камерах с электродами различной конфигурации. Наиболее распространенными способами зажигания разряда являются погружение металлического электрода в электролит и размещение металлического электрода на некотором расстоянии от поверхности электролита [2, 3].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 21-79-30062).

© Петряков С. Ю., Мирханов Д. Н., Гайсин Ал. Ф., Басыров Р. Ш., Кашапов Н. Ф., 2022

Интерес к плазменно-жидкостным системам обусловлен тем, что в данной области исследований сложным образом связаны три системы, описывающие соответственно физику процессов в плазменном (газовый разряд), жидком (непроточный и проточный электролиты) и газообразном (окружающий воздух) фазовых состояниях. В этих системах насчитывается более 50 заряженных или нейтральных атомных и молекулярных частиц, которые вступают в реакцию друг с другом и оказывают влияние на баланс энергии в разряде [4]. Сложность проведения численных расчетов обусловлена тем, что математическая модель плазменно-жидкостных систем может включать более 30 уравнений в зависимости от количества учитываемых частиц. Полученные при этом результаты плохо согласуются с экспериментальными данными, что затрудняет создание единой классификации плазменно-жидкостных систем, аналогичной известной классификации разрядов в случае использования твердых электродов (искрового, дугового, тлеющего, коронного и др.) [5]. В то же время одним из направлений систематизации разрядов с жидкими электродами является их классификация по элементарным процессам, поэтому создание на их основе математических моделей, результаты расчетов по которым качественно и количественно согласуются с экспериментальными данными, является актуальной задачей.

Вместе с тем плазменно-жидкостные системы применяются при решении различных прикладных задач машиностроения, металлообработки, медицины и космической промышленности. Исследуется возможность применения разрядов с жидкими электродами при обработке изделий со сложной геометрией внешней и внутренней поверхностей, изготовленных с использованием как традиционных методов производства (штамповка, литье и др.) [6–8], так и аддитивных методов лазерного спекания металлических порошков [9]. В ряде работ представлены результаты использования плазменно-жидкостных систем для производства мелкодисперсных порошков металлов [10], получения наночастиц [11, 12], нанесения покрытий на изделия [13, 14], анализа концентрации частиц в жидкости [15, 16], создания плазмохимических реакторов [17, 18], а также для стерилизации и очистки твердых тел, воды и воздуха [19]. Применение данных систем обусловлено большим разнообразием конфигураций газоразрядных камер, режимов и параметров зажигания и горения разряда, а также плазмохимическими процессами, связанными с переносом вещества и заряда на границе раздела фаз [20, 21].

Целью данной работы является исследование свойств получаемого разряда при погружении алюминиевого анода в электролитический катод при атмосферном давлении, в частности его электрофизических, спектральных и тепловых параметров. С целью интерпретации обнаруженных эффектов проведены численные эксперименты, в которых моделируются напряженность электрического поля и начальная стадия разряда.

1. Экспериментальная установка. На рис. 1 представлена схема газоразрядной камеры для зажигания и поддержания разряда между алюминиевым анодом и электролитическим катодом (3 %-й раствор NaCl в очищенной воде) при атмосферном давлении.

В качестве металлического анода применялся цилиндрический стержень из алюминиевого сплава марки АМЦ-40. Анод погружался в электролит и с помощью автоматического манипулятора перемещался в вертикальной плоскости на расстояние, равное 30 мм. Для подвода отрицательного потенциала в электролит погружалась металлическая пластина из меди. Для контроля температуры раствора электролита в ванне используется термостат. Термостатирование электролита проводилось с помощью циркуляционного охладителя рефрижераторного типа. Обновление электролита в ванне осуществлялось с помощью системы подачи и откачки электролита. Для очищения раствора от примесей в системе используется фильтр грубой очистки. Пары электролита удалялись из зоны исследования разряда с помощью стационарной вытяжки и вентилятора.

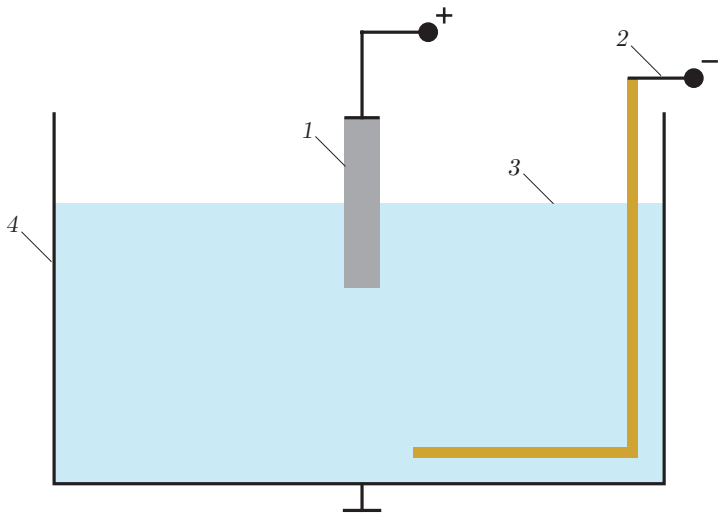

Рис. 1. Схема газоразрядной камеры:
1 — алюминиевый анод, *2* — медная пластина для подвода отрицательного потенциала в электролит, *3* — электролит (3 %-й раствор NaCl в очищенной воде), *4* — электролитическая ячейка

Экспериментальная установка оснащена высоковольтным генератором мощностью 40 кВт с изменяемым напряжением до 4 кВ при номинальной силе тока до 10 А, который обеспечивает питание тока в разряде, а также диагностического и вспомогательного оборудования. Генератор питания осуществляет преобразование и регулирование сетевого напряжения. Генератор состоит из высоковольтного и низковольтного регулируемых блоков, которые обеспечивают необходимые диапазоны устанавливаемых напряжения и силы тока. Установка заземлена. Текущие значения силы тока и напряжения передавались с пульта источника на управляющий компьютер и контролировались оператором.

Экспериментальные исследования разряда проводились при следующих значениях параметров: напряжение $U = 100 \div 500$ В, плотность анодного тока $j_a = 0{,}2 \div 0{,}6$ А/см^2, давление $p = 10^5$ Па, температура электролита $T = 10 \div 25$ °С, диаметр анода $d_a = 5$ мм, удельная электропроводность электролита $\sigma = 0{,}10 \div 0{,}12$ Ом$^{-1}\cdot$ см$^{-1}$.

Приведенные в работе задачи решались с использованием современного диагностического оборудования и различных методов.

Видеосъемка протекающих в зоне горения разряда процессов, а также образующихся при этом плазменных структур осуществлялась с помощью высокоскоростной видеокамеры марки Casio EX-F1. Вследствие высокой скорости протекающих в зоне горения разряда процессов скорость съемки была выбрана равной 1200 и 600 кадр/с. Камера, установленная на штатив на расстоянии 300 мм от зоны горения разряда, передавала получаемую информацию на ЭВМ. Обработка полученных данных проводилась с использованием программного обеспечения HX Link и Movavi Video Editor 14 Plus. Одновременно выполнялось детальное исследование анодных и катодных пятен на поверхности жидкого и металлического электродов с помощью микроскопа СП-52.

Излучение плазмы разряда анализировалось методом эмиссионной спектроскопии на оптико-волоконном спектрометре марки PLASUS EC 150201 MC. Излучение разряда регистрировалось с помощью коллиматора для фиксации световых лучей в диапазоне длин волн $195 \div 1105$ нм. Коллиматор подводился к зоне горения разряда на расстояние $100 \div 200$ мм. Калибровка аппаратной функции системы проводилась с использованием светового излучения лампы марки СИРШ 6-100. В качестве аппаратной ширины принята ширина минимальных одиночных и наиболее узких линий спектра, равная $\Delta\lambda_{\mathrm{G}} = 1$ нм.

Исследуемое излучение собиралось во всем объеме формируемого разряда, поэтому оценка состава и компонентов плазмы выполнена без привязки к определенной точке. Анализ полученных данных осуществлялся путем сопоставления исследуемого спектра с базой данных Национального института стандартов и технологий (США). Значения колебательной и вращательной температур тяжелого компонента плазмы определялись путем сравнения экспериментально зарегистрированного молекулярного спектра со спектром, полученным в расчетной модели с использованием программ LIFBASE и SPECAIR 2.2.0.0.

Для анализа распределения температуры исследуемой поверхности металлического и электролитического электродов в процессе горения разряда использовалась тепловизионная камера марки FLIRA6500SC с пространственным разрешением детектора 640×512 пикселей в рабочем диапазоне линий спектра $3{,}6 \div 4{,}9$ мкм. Тепловизор обеспечивал фиксированную температуру поверхности электродов в калиброванном диапазоне $4 \div 2400$ °C. Для калибровки тепловизионной камеры использовался многоволновой пирометр. Применение пирометра обусловлено тем, что при горении разряда могут образовываться оксидная пленка и окалина, вследствие чего при измерении температуры могут возникать погрешности. Обработка полученных значений проводилась на ЭВМ с программным обеспечением ALTAIR v5.91.010.

Пульсации, колебания тока и напряжения разряда исследовались с использованием цифровых осциллографов марок GDS-806S и GOS-6030. С целью обеспечения контроля электрофизических параметров в момент зажигания и поддержания разряда к осциллографам подключалось устройство для регистрации оптического излучения разряда на фотодиодах с микросхемой.

Моделирование разряда осуществлялось в среде ANSYS FLUENT 16.2. Исследовался процесс протекания тока в электролитической ячейке с заземленным проводящим днищем. Путем геометрических построений была создана расчетная область с размерами $100 \times 100 \times 40$ мм. Задача решалась с использованием метода конечных элементов, расчетная область разбивалась на элементы в виде тетраэдров. Модель представляла собой трехкомпонентную систему жидкость — воздух — пар. Для жидкой фазы учитывалось наличие в электролите ионов, для парогазовой фазы — процессы испарения, конденсации и межфазного теплообмена. Система, описывающая динамику парогазовой среды и жидкости, включает уравнения неразрывности смеси, движения (импульсов), энергии и потенциала электрического поля.

2. Обсуждение результатов. Исследование инициирования разряда в результате контакта алюминиевого анода диаметром $d_a = 5$ мм с поверхностью электролитического катода показало, что при подаче напряжения в диапазоне $100 \div 170$ В на границе контакта электродов происходит процесс испарения электролита с образованием паровоздушных пузырей различного диаметра. Протекающий в цепи ток запускает процессы джоулева тепловыделения с поверхности металлического анода и выделения растворенных веществ из электролита, что характерно для электролиза. Процесс электролиза определяется переносом электрического тока в жидкости и типом разряда содержащихся в растворе ионов электролита. Изменяя состав, концентрацию и температуру электролита, можно изменять характер электродных процессов. В то же время пробой не наблюдается, так как вкладываемая в разряд мощность остается недостаточной для ионизации паровоздушной среды и инициирования электронной лавины.

При увеличении напряжения с 200 до 400 В интенсивность протекающих в межэлектродном промежутке процессов увеличивается, а раствор вокруг алюминиевого анода начинает кипеть (рис. 2). В объеме электролита возникает граница разделения фаз, вокруг анода образуется паровоздушная оболочка. В некоторый момент времени напряженность электрического поля достигает значений, достаточных для запуска процессов, инициру-

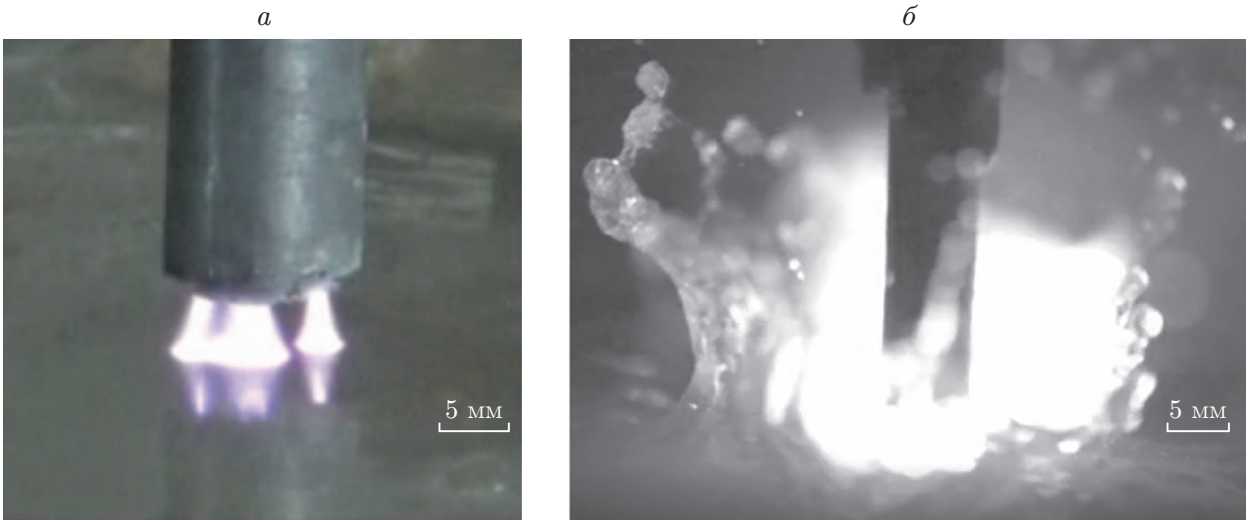

Рис. 2. Процесс горения электрического разряда в области между алюминиевым анодом и электролитическим катодом при $p = 10^5$ Па, $d_a = 5$ мм:
а — $U = 400$ В, $I = 0{,}55$ А, *б* — $U = 800$ В, $I = 8$ А

ющих пробой газового промежутка между электродами. В результате пробоя на границе раздела сред возникают микроразряды в форме усеченного конуса, вершина которого опирается на поверхность алюминиевого анода, а основание — на поверхность электролитического катода (см. рис. 2,*а*). Электрические разряды формируются в виде импульсов силы тока в диапазоне $I = 0{,}2 \div 1{,}8$ А. Вместе с тем процесс формирования и поддержания разряда сопровождается образованием анодных и катодных пятен на поверхности электродов. Плазменные структуры и пятна периодически появляются и беспорядочно перемещаются на границе раздела сред в пространстве между электродами. При этом температура увеличивается вдоль поверхности алюминиевого анода в диапазоне $100 \div 180$ °C (рис. 3). Беспорядочный характер перемещения исследуемых объектов по поверхности электродов может быть объяснен локальным изменением электрического поля вследствие плавления и изменения микрорельефа поверхности алюминиевого анода.

С увеличением напряжения с 600 до 800 В меняются скорость и характер протекающих на границе раздела сред процессов. Конусообразные плазменные структуры и локальные пятна на поверхности электродов сливаются и переходят в объемный (диффузный) разряд (см. рис. 2,*б*). Из анализа колебаний силы тока и напряжения разряда следует, что значения силы тока возрастают с 0,5 до 11,0 А, а частота формирования импульсов тока уменьшается (рис. 4). Горение объемного (диффузного) разряда сопровождается интенсивным выделением конвективных паровоздушных потоков, образованием капель различного диаметра, акустическими хлопками, турбулентным перемешиванием электролита и возмущением поверхности раствора. Изменение динамики протекающих в системе процессов может быть объяснено увеличением вкладываемой в разряд мощности. В результате формирования разряда высокой мощности наблюдаются процессы, характерные для электрогидравлического взрыва с образованием ударных волн, которые, распространяясь в околоэлектродном пространстве, возмущают и вытесняют раствор электролита от поверхности алюминиевого анода. Эти процессы могут приводить к увеличению межэлектродного расстояния, затуханию разряда и размыканию цепи. Далее паровоздушная оболочка схлопывается и раствор электролита взаимодействует с поверхностью сильно нагретого анода, что приводит к повторному пробою и зажиганию разряда.

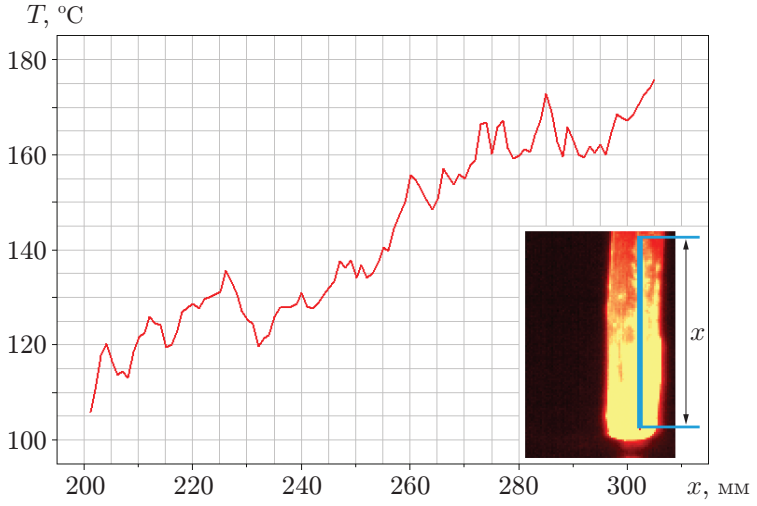

Рис. 3. Распределение тепловых потоков вдоль алюминиевого анода в процессе горения электрического разряда (x — длина исследуемого участка на поверхности алюминиевого анода)

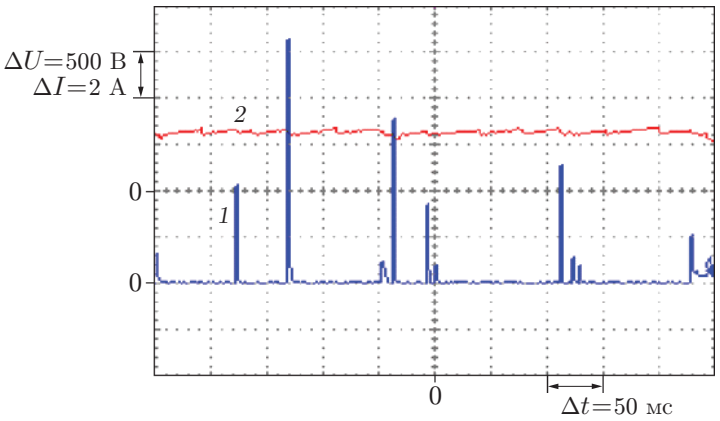

Рис. 4. Осциллограммы колебаний силы тока (*1*) и напряжения (*2*) разряда

Анализ спектра излучения показывает, что на исследуемом участке плазмы присутствуют различные молекулы, ионы и атомы водорода, алюминия, натрия. Аппаратное уширение в исследуемом спектре (минимальная ширина спектральной линии, которую может зафиксировать спектрометр) проверено по атомарной линии Al I (669,7 нм). Минимальная ширина оптически тонких и наиболее узких линий составила $\Delta\lambda_{\mathrm{G}} \approx 1$ нм. Эта ширина принята в качестве аппаратной ширины ($\Delta\lambda_{\mathrm{G}}$ — полуширина контура Гаусса). Оценка концентрации электронов в плазме рассчитывалась по полуширине нескольких водородных линий в серии Бальмера. Измеренная полуширина $\Delta\lambda_{\mathrm{F}}$ линии H_α равна 1,36 нм, для линии H_β полуширина составляет $\Delta\lambda_{\mathrm{F}} = 1{,}59$ нм. С учетом аппаратной составляющей уширение линии вследствие влияния давления (лоренцева полуширина) определялось по формуле

$$\Delta\lambda_{\mathrm{F}} \approx 0{,}5346\,\Delta\lambda_{\mathrm{L}} + \sqrt{0{,}2166\,\Delta\lambda_{\mathrm{L}}^2 + \Delta\lambda_{\mathrm{G}}^2}\,,$$

где $\Delta\lambda_{\mathrm{F}}$ — полуширина контура Фойгта; $\Delta\lambda_{\mathrm{L}}$ — полуширина контура Лоренца.

Полуширина контуров Фойгта и Лоренца и соответствующие значения концентрации электронов на линиях водорода

Линия водорода	$\Delta\lambda_{\rm F}$, нм	$(n_e)_{\rm F}$, см$^{-3}$	$\Delta\lambda_{\rm L}$, нм	$(n_e)_{\rm L}$, см$^{-3}$
$\rm H_\alpha$	1,36	$3 \cdot 10^{16}$	0,60	$5{,}8 \cdot 10^{16}$
$\rm H_\beta$	1,59	$2 \cdot 10^{16}$	0,93	$9{,}4 \cdot 10^{15}$

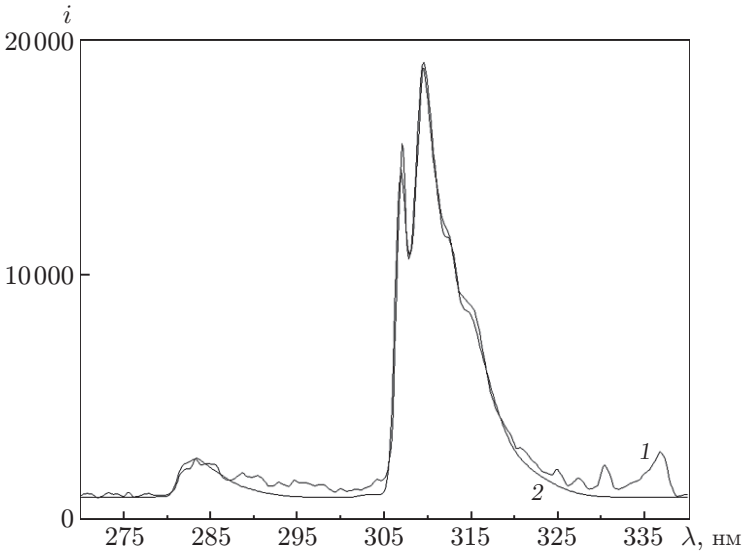

Рис. 5. Экспериментальный (*1*) и модельный (*2*) спектры для молекулярной полосы OH (i — интенсивность излучения)

Концентрация электронов определялась по соотношению, приведенному в работе [22]:

$$n_e = 10^{13}(\Delta\lambda_{\rm L})^{3/2}\Big(C_0(T) + \sum_{n=1}^{m} C_n(T)(\ln\Delta\lambda_{\rm L})^n\Big).$$

Для линии $\rm H_\alpha$ полуширина контура Лоренца равна $\Delta\lambda_{\rm L} = 0{,}601$ нм, для линии $\rm H_\beta$ $\Delta\lambda_{\rm L} = 0{,}93$ нм (см. таблицу). Согласно данным [22] для линии $\rm H_\alpha$ значение $\Delta\lambda_{\rm L} = 1{,}36$ нм соответствует концентрации электронов $n_e = 5{,}8 \cdot 10^{16}$ см$^{-3}$, для линии $\rm H_\beta$ значение $\Delta\lambda_{\rm L} = 0{,}93$ нм соответствует концентрации электронов $n_e = 9{,}4 \cdot 10^{16}$ см$^{-3}$, а согласно данным [23] полуширина линии $\rm H_\alpha$ соответствует концентрации $n_e = 1{,}9 \cdot 10^{16}$ см$^{-3}$, полуширина линий $\rm H_\beta$ — концентрации $n_e = 2 \cdot 10^{16}$ см$^{-3}$. Поскольку полуширина линии $\rm H_\beta$ $\Delta\lambda_{\rm F} = 1{,}59$ нм больше полуширины линии $\rm H_\alpha$ $\Delta\lambda_{\rm F} = 1{,}36$ нм, концентрацию электронов следует определять по линии $\rm H_\beta$, так как для нее вклад аппаратной функции в полуширину физического (измеряемого) контура менее значителен. Тогда концентрация электронов равна $n_e = 9{,}4 \cdot 10^{16}$ см$^{-3}$.

Для оценки колебательной T_ν и вращательной T_r температур тяжелого компонента исследовались молекулярные полосы. Наиболее четко в спектре определяется наличие молекулы OH(A–X) (A–X — разрешенный электродипольный переход). Анализ температур проводился путем сравнения экспериментально полученного спектра с расчетным (рис. 5). Вращательная и колебательная температуры оказались равными $T_r = 3550$ K и $T_\nu = 4900$ K. Для определения температуры электронов необходимы атомарные или ионные линии спектра.

В начальном состоянии электролитическая ячейка заполнена электролитом до уровня 20 мм. Применяется модель многофазной среды. Рассматриваются три фазы: воздух, жид-

кий электролит и пары воды. Учитываются джоулево тепловыделение, теплопроводность и конвекция, парообразование и конденсация воды, поверхностное натяжение, процессы гидрогазовой динамики. При использовании модели многофазной среды решаются следующие уравнения:

— уравнение неразрывности смеси

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho_m + \nabla\cdot(\rho_m \boldsymbol{v}_m) = 0,$$

где $\boldsymbol{v}_m$ — среднемассовая скорость смеси:

$$\boldsymbol{v}_m = \frac{1}{\rho_m}\sum_{k=1}^{3}\alpha_k\rho_k\boldsymbol{v}_k,$$

ρ_m — средняя плотность:

$$\rho_m = \sum_{k=1}^{3}\alpha_k\rho_k,$$

α_k, ρ_k — объемная доля и плотность k-го компонента:

$$\sum_{k=1}^{3}\alpha_k = 1;$$

— уравнение движения (уравнение импульсов)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m\boldsymbol{v}_m) + \nabla\cdot(\rho_m\boldsymbol{v}_m\cdot\boldsymbol{v}_m) = -\nabla p + [\mu_m(\nabla\boldsymbol{v}_m + \nabla\boldsymbol{v}_m^{\mathrm{T}})] + \\ + \rho_m\boldsymbol{g} + \boldsymbol{F} + \nabla\cdot\Big(\sum_{k=1}^{3}\alpha_k\rho_k\boldsymbol{v}_{dr,k}\cdot\boldsymbol{v}_{dr,k}\Big),$$

где μ_m — средний коэффициент вязкости смеси:

$$\mu_m = \sum_{k=1}^{3}\alpha_k\mu_k,$$

$\boldsymbol{v}_{dr,k}$ — дрейфовая скорость k-го компонента:

$$\boldsymbol{v}_{dr,k} = \boldsymbol{v}_k - \boldsymbol{v}_m,$$

p — давление; $\boldsymbol{g}$ — ускорение свободного падения; $\boldsymbol{F}$ — вектор объемных сил (например, поверхностного натяжения);

— уравнение энергии

$$\frac{\partial}{\partial t}\Big(\sum_{k=1}^{3}\alpha_k\rho_k E_k\Big) + \nabla\cdot\Big(\sum_{k=1}^{3}\alpha_k\boldsymbol{v}_k(\rho_k E_k + p)\Big) = \nabla\cdot(k_{eff}\nabla T) + S_E, \tag{1}$$

где k_{eff} — эффективный коэффициент теплопроводности k-го компонента:

$$k_{eff} = \sum_{k=1}^{3}\alpha_k(k_k + k_t),$$

k_t — теплопроводность, обусловленная наличием турбулентности; S_E — объемная плотность мощности источников теплоты.

В (1) для удельной энергии газовой фазы принимается выражение

$$E_k = h_k - \frac{p}{\rho_k} + \frac{v_k^2}{2}$$

(h_k — удельная энтальпия), а для удельной энергии жидкой фазы — выражение

$$E_k = h_k.$$

В данной модели учитывается джоулево тепловыделение:

$$S_E = \boldsymbol{j} \cdot \boldsymbol{E} = \sigma E^2. \tag{2}$$

Здесь $\boldsymbol{j}$ — плотность тока; $\boldsymbol{E}$ — напряженность электрического поля; σ — удельная электропроводность электролита.

Уравнение неразрывности электрического тока записывается в виде

$$\operatorname{div} \boldsymbol{j} = 0,$$

где $\boldsymbol{j} = \sigma \boldsymbol{E}$.

Для электростатического поля $\boldsymbol{E} = -\operatorname{grad} \varphi$, тогда уравнение для потенциала электрического поля принимает вид

$$\operatorname{div} (\sigma \operatorname{grad} \varphi) = 0.$$

Для уравнения (2) приняты следующие граничные условия. На нижней проводящей пластине $\varphi = 0$, на металлическом электроде $\varphi = U$ (U — приложенное напряжение). На боковых диэлектрических стенках принято условие Неймана $\partial\varphi/\partial n = 0$, что соответствует непротеканию тока.

На боковых вертикальных стенках для уравнения энергии ставится условие конвективного теплообмена с окружающим атмосферным воздухом, давление которого равно $p_0 = 105$ Па, температура $T_a = 300$ К.

Конвективный теплообмен описывается уравнением Ньютона — Рихмана

$$q = \alpha(T_a - T_w),$$

где q — плотность теплового потока; α — коэффициент теплоотдачи; T_w — температура стенки.

Для определения α используются следующие критерии:

— критерий Прандтля

$$\mathrm{Pr} = \frac{\nu}{a} \tag{3}$$

(ν — кинематическая вязкость воздуха; $a = k/(c_p\rho)$ — температуропроводность; c_p — теплоемкость воздуха при постоянном давлении; ρ — плотность воздуха; k — теплопроводность);

— критерий Грасгофа

$$\mathrm{Gr} = \frac{gl^3\beta\,\Delta T}{\nu^2} \tag{4}$$

(l — высота вертикальной стенки; β — коэффициент объемного расширения воздуха; $\Delta T = T_a - T_w$);

— критерий Нуссельта, определяющий конвекцию вблизи вертикальной стенки:

$$\mathrm{Nu} = 0{,}75(\mathrm{Gr}\,\mathrm{Pr})^{0{,}25}. \tag{5}$$

Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \frac{\mathrm{Nu}\,k}{l} \tag{6}$$

для данной модели равен 14 Вт/(м$^2 \cdot$ К).

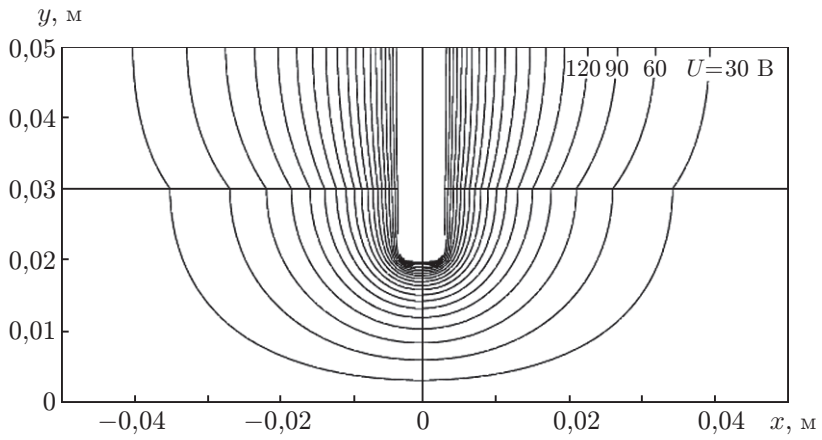

Рис. 6. Эквипотенциальные линии электрического поля в вертикальном сечении, проходящем через ось симметрии

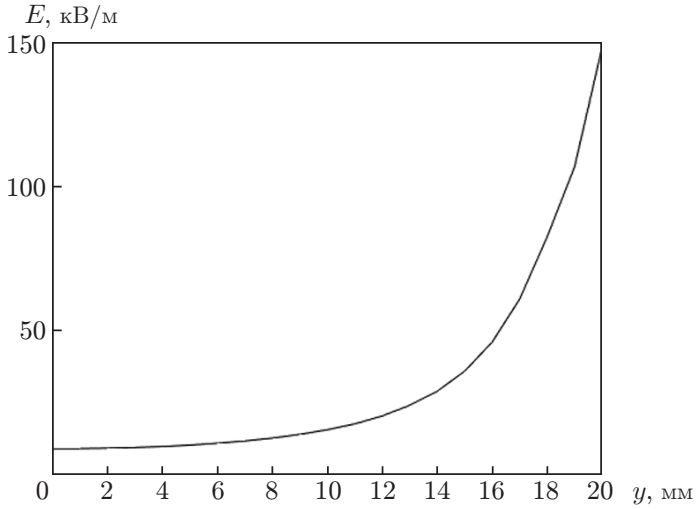

Рис. 7. Зависимость модуля напряженности электрического поля от координаты y вдоль оси симметрии разряда

На верхней границе расчетной области принято условие постоянства давления $p = p_0$, вследствие конвекции частицы среды могут свободно пересекать эту поверхность.

При расчетах электрических параметров принято значение удельной электропроводности 3 %-го раствора NaCl, равное $\sigma = 0{,}54$ См/м. На рис. 6 приведены расчетные эквипотенциальные линии электрического поля при напряжении на электроде $U = 600$ В, на рис. 7 — зависимость модуля напряженности электрического поля от вертикальной координаты y вдоль оси симметрии разряда. Вблизи электрода напряженность электрического поля достигает значения $E \approx 150$ кВ/м. При протекании тока происходит локальный нагрев электролита вблизи электрода, что приводит к образованию пузырьков пара.

Оценим характерное время парообразования τ за счет джоулева тепловыделения (2). В пренебрежении теплоемкостью и теплопроводностью вся выделяемая мощность расходуется на парообразование:

$$S_E \, \Delta V \, \tau = r \rho \, \Delta V.$$

Здесь r — удельная теплота парообразования; ρ — плотность воды; ΔV — малый объем электролита. Отсюда следует $\tau = r\rho/(\sigma E^2) \approx 0{,}2$ с.

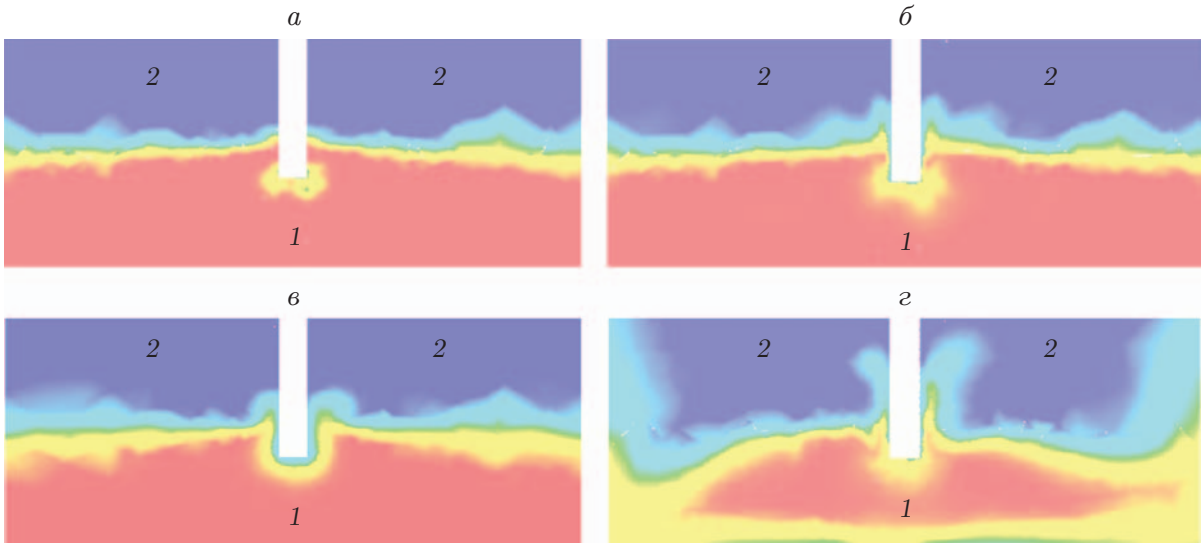

Рис. 8. Области электролита (*1*) и пара (*2*):
а — $t = 1{,}6$ с, *б* — $t = 2{,}0$ с, *в* — $t = 2{,}4$ с, *г* — $t = 2{,}6$ с

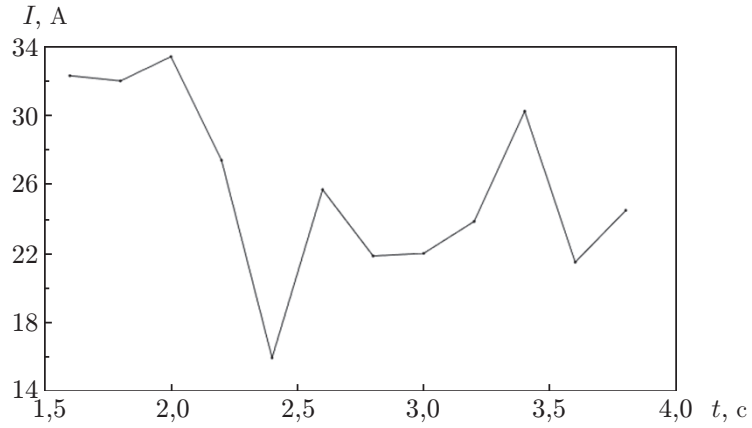

Рис. 9. Расчетная зависимость силы тока между анодом и медной пластиной (см. рис. 1) от времени

На рис. 8 приведены области электролита и пара в различные моменты времени. Сначала пузырьки образуются вблизи нижней кромки электрода, где напряженность поля и, следовательно, объемная плотность выделяемой мощности максимальны (см. рис. 8,*а*). В дальнейшем пар охватывает погруженную часть электрода, что приводит к уменьшению площади области контакта с электролитом (см. рис. 8,*б,в*). Затем вследствие конвекции вблизи электрода появляется вертикально направленный поток пара и жидкости, что приводит к увеличению площади области контакта с электролитом (см. рис. 8,*г*).

Вследствие изменения площади области контакта электролита с погруженным электродом возникают пульсации тока (рис. 9). В диапазоне $t = 1{,}5 \div 2{,}0$ с площадь области контакта металлического электрода с электролитом максимальная, что соответствует наибольшему значению силы тока. Далее в результате динамических процессов, происходящих на границе области взаимодействия электродов (см. рис. 8), площадь этой области периодически меняется, что приводит к уменьшению и увеличению силы тока в интервале времени $t = 2{,}40 \div 3{,}75$ с. Характерное время пульсаций тока приблизительно совпадает с рассчитанным значением $\tau \approx 0{,}2$ с.

Заключение. В результате проведенного исследования получены следующие результаты.

Обнаружены формирование конусообразных плазменных микроканалов и образование анодных и катодных пятен на поверхности электродов в диапазоне значений напряжения $200 \div 500$ В. При увеличении напряжения с 600 до 800 В формируется разряд в виде импульсов силы тока в диапазоне $0{,}2 \div 11{,}0$ А.

Установлено, что в спектре разряда присутствуют различные атомы и молекулы. Полученная по уширению линии H_β концентрация электронов равна $n_e = (9{,}4 \pm 0{,}4) \times 10^{16}$ см$^{-3}$. Вращательная и колебательная температуры молекулы гидроксила OH равны $T_r = 3550$ K, $T_\nu = 4900$ K соответственно.

Представлены результаты численного моделирования процесса протекания тока в электролитической ячейке и начальной стадии разряда.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки математических моделей плазменно-жидкостных систем с рассматриваемой конфигурацией электродов, а также при создании плазменных устройств для обработки поверхности металлических изделий из алюминия.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Bruggerman P., Kushner M. J., Locke B. R., et al.** Plasma-liquid interactions: a review and roadmap // Plasma Sources Sci. Technol. 2016. V. 25. 053002.
2. **Gaisin Al. F., Son E. E., Efimov A. V., et al.** Spectral diagnostics of plasma discharge between a metal cathode and liquid anode // High Temperature. 2017. V. 55. P. 457–460.
3. **Kashapov N., Kashapov R., Kashapov L.** Influence of the electrolytic cathode temperature on the self-sustaining mechanism of plasma-electrolyte discharge // J. Phys. D: Appl. Phys. 2018. V. 51. 494003.
4. **Sakiyama Y., Graves D. B., Chang H.-W., et al.** Plasma chemistry model of surface microdischarge in humid air and dynamics of reactive neutral species // J. Phys. D: Appl. Phys. 2012. V. 45. 425201.
5. **Raizer Y. P.** Gas discharge physics / Y. P. Raizer, J. E. Allen. Berlin: Springer, 1997.
6. **Meletis E. I., Nie X., Wang F. L., Jiang J.** Electrolytic plasma processing for cleaning and metal-coating of steel surfaces // Surface Coatings Technol. 2002. V. 150. P. 246–256.
7. **Ishijima T., Nosaka K., Tanaka Y., et al.** A high-speed photoresist removal process using multibubble microwave plasma under a mixture of multiphase plasma environment // Appl. Phys. Lett. 2013. V. 103. 142101.
8. **Gaisin Al. F.** Investigation of the effect of a low-temperature plasma of vapor-gas discharges with the use of electrolytic electrodes at lower pressure on products of complex shape // Inorgan. Materials: Appl. Res. 2017. V. 8. 392.
9. **Gaysin Al. F., Gil'mutdinov A. Kh., Mirkhanov D. N.** Electrolytic-plasma treatment of the surface of a part produced with the use of additive technology // Metal Sci. Heat Treatment. 2018. V. 60. P. 128–132.
10. **Kashapov R., Kashapov L., Kashapov N.** Research of plasma-electrolyte discharge in the processes of obtaining metallic powders // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 927. 012086.
11. **Wüthrich R., Allagui A.** Building micro and nanosystems with electrochemical discharges // Electrochimica Acta. 2010. V. 55. P. 8189–8196.
12. **Abdul K. T., Kaliani A. A.** Glow discharge plasma electrolysis for nanoparticles synthesis // Ionics. 2012. V. 18. P. 315–327.

13. **Saito G., Hosokai S., Tsubota M., Akiyama T.** Synthesis of copper/copper oxide nanoparticles by solution plasma // J. Appl. Phys. 2011. V. 110. 023302.
14. **Paulmier T., Bell J. M., Fredericks P. M.** Deposition of nano-crystalline graphite films by cathodic plasma electrolysis // Thin Solid Films. 2007. V. 515. P. 2926–2934.
15. **Quan C., He Y.** Properties of nanocrystalline Cr coatings prepared by cathode plasma electrolytic deposition from trivalent chromium electrolyte // Surface Coatings Technol. 2015. V. 269. P. 319–323.
16. **Mezei P., Czerfalvi T., Janossy M., et al.** Similarity laws for glow discharges with cathodes of metal and an electrolyte // J. Phys. D: Appl. Phys. 1998. V. 31. 2818.
17. **Smoluch M., Mielczarek P., Silberring J.** Plasma-based ambient ionization mass spectrometry in bioanalytical sciences // Mass Spectrom. Rev. 2016. V. 35. P. 22–34.
18. **Becker K. H., Schoenbach K. H., Eden J. G.** Microplasmas and applications // J. Phys. D: Appl. Phys. 2006. V. 39. R55.
19. **Son E. E., Sadriev R. Sh., Gaisin Al. F., et al.** Peculiarities of microwave discharge between a copper pin electrode and technical water // High Temperature. 2014. V. 52. 939.
20. **Bruggeman P., Leys C.** Non-thermal plasmas in and in contact with liquids // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. V. 42. 053001.
21. **Samukawa S., Hori M., Rauf Sh., et al.** The 2012 plasma roadmap // J. Phys. D: Appl. Phys. V. 45. 253001.
22. **Касабов Г. А.** Спектроскопические таблицы для низкотемпературной плазмы: Справ. / Г. А. Касабов, В. В. Елисеев. М.: Атомиздат, 1973.
23. **Очкин В. Н.** Спектроскопия низкотемпературной плазмы. М.: Физматлит, 2006.

Поступила в редакцию 27/X 2021 г.,
после доработки — 7/XII 2021 г.
Принята к публикации 27/XII 2021 г.