

УДК 537.528

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В УСЛОВИЯХ ГОРЕНИЯ РАЗРЯДА С ЖИДКИМ (НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИМ) КАТОДОМ

© 2023 г. Ал. Ф. Гайсин*, Ф. М. Гайсин, Р. Ш. Басыров,
Р. Р. Каюмов, Д. Н. Мирханов, С. Ю. Петряков

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ, г. Казань, Россия

*E-mail: almaz87@mail.ru

Поступила в редакцию 13.12.2022 г.

После доработки 25.01.2023 г.

Принята к публикации 11.05.2023 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований и численных расчетов параметров электрического разряда с жидким (неметаллическим) катодом в потоке воздуха атмосферного давления. Описаны формы плазменных структур, возникающих в межэлектродном промежутке. С помощью оптической эмиссионной спектроскопии установлены состав плазмы и концентрация электронов. Методом инфракрасной термографии определена температура поверхности электродов в зоне горения разряда. Построена вольт-амперная характеристика разряда. Приведены результаты численных расчетов распределения плотности мощности джоулевого тепловыделения и напряженности электрического поля вблизи металлического анода. Описано образование парожидкостной смеси вокруг погруженной части металлического анода в электролит.

DOI: 10.31857/S004036442304004X

ВВЕДЕНИЕ

Газоразрядная плазма с жидкими (неметаллическими) электродами является объектом быстроразвивающейся междисциплинарной области исследований, включающей в себя науку о плазме, тепломассопереносе, гидрогазодинамике, фотолизе и многофазной химии [1]. Зажигание таких разрядов осуществляется в рабочих камерах, где один или оба электрода являются жидкостью. В качестве жидкого электрода, как правило, применяются растворы солей различных концентраций в дистиллированной, технической или очищенной водопроводной воде. В данных разрядах сложным образом переплетены три подсистемы, для описания которых необходимо знание процессов в плазменном, жидком (непроточный или проточный электролит) и газовом (окружающий воздух) фазовых состояниях. Плазма, взаимодействующая с жидкостью, может генерироваться при постоянном напряжении, переменным током низких частот, высокочастотным током 13.56 МГц и микроволновым возбуждением в диапазоне сверхвысоких частот. Рабочие давления варьируются от очень низких значений (при использовании ионных жидкостей) до очень высоких в сверхкритических жидкостях. Для плазменно-жидкостных систем характерна сложность разработки математических моделей и проведения численных расчетов плазменно-жидкостных систем. Полученные при этом результаты неудовлетворительно коррелируют с экспериментальными данными [2]. Все это затрудняет созда-

ние единой классификации плазменно-жидкостных систем, аналогично той, которая существует для газовых разрядов, зажигаемых между твердыми электродами (искровой, дуговой, тлеющий, коронный и др.) [3]. Одним из возможных направлений систематизации разрядов с жидкими электродами выступает их классификация по элементарным процессам, поэтому проведение экспериментальных исследований и математического моделирования разрядов с жидкими электродами в лабораторных условиях является актуальной задачей.

В настоящее время существуют различные типы, формы и конфигурации электродов для исследования разрядов с жидкими (неметаллическими) электродами, твердым и жидким (неметаллическим) электродами [4–7], между двумя жидкими электродами [8–10], разрядов в газожидкостных потоках [11]. На основании анализа опубликованных работ можно заключить, что наиболее устойчивые системы зажигания плазменно-жидкостных систем формируются при погружении твердого электрода в жидкость, либо при расположении твердого электрода над поверхностью жидкости. В центре внимания специалистов находится взаимодействие плазмы с жидкостью, в частности физические и химические механизмы на границе раздела сред [12–14]. Остаются вопросы по типам и свойствам образующихся плазменных структур как в области плазменного столба, так и в виде пятен на поверхности твердых и жидких электродов [15–18].

Наряду с этим плазменно-жидкостные системы находят широкое применение при решении различных прикладных задач. В публикациях описаны применения разряда с жидким (неметаллическим) электродом для полировки металлических изделий со сложной геометрией внешней и внутренней поверхностей с повышением параметров шероховатости на 1–2 класса, зачистки заусенцев и скругления острых углов, очистки поверхностей от загрязнений и подготовки ее перед нанесением покрытий [19–21]. Широкое разнообразие применений плазменно-жидкостных систем связано с большим количеством конфигураций газоразрядных камер, режимов и параметров зажигания и горения разряда, а также плазмохимических процессов, связанных с переносом вещества и заряда на границе раздела фаз [22–28].

Целью данной работы является исследование типов и форм, а также электрофизических, тепловых и спектральных характеристик электрического разряда постоянного тока, поддерживаемого между металлическим анодом и электролитическим катодом при атмосферном давлении. Полученные результаты могут быть использованы для разработки математических моделей разрядов, а также создания плазменных устройств.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для зажигания и поддержания разряда использовалась экспериментальная установка с рабочей камерой, схема которой показана на рис. 1. Разряд исследовался при двух конфигурациях расположения электродов: 1) при погружении металлического анода в электролитический катод; 2) при расположении металлического анода в вертикальной плоскости на некотором расстоянии над поверхностью электролитического катода. В качестве анода использовалась пластина, изготовленная методом селективного лазерного спекания на основе сырья из металлического порошка марки “РН1”. Электролит представлял собой 5%-ный раствор NaCl в очищенной водопроводной воде.

Исследование электрического разряда осуществлялось при напряжении $U = 0.1–1.5$ кВ, глубине погружения металлического анода в электролит $h = 3$ мм, межэлектродном промежутке $i = 1–10$ мм, диаметре металлического анода $d_a = 6$ мм. Эксперименты осуществлялись в потоке воздуха с $v = 0.2$ м/с при атмосферном давлении $p = 10^5$ Па.

На рис. 1а показана схема рабочей камеры для поддержания разряда при погружении металлического анода в электролитический катод. Она состоит из металлического анода 1, предварительно погруженного в ванну с раствором электролита 4. В ванне предусмотрена металлическая пластина 2 для подвода к электролиту отрицательного потенциала. Область 3 соответствует зоне горения

электрического разряда в парогазовой смеси около металлического анода. Для контроля температуры раствора электролита в ванне предусмотрен термостат. Термостатирование осуществлялось с помощью циркуляционного охладителя рефрижераторного типа. Обновление электролита в ванне производилось с помощью системы подачи и откачки электролита. Для очищения раствора от примесей в системе предусмотрен фильтр грубой очистки. Удаление паров электролита из зоны исследования разряда осуществлялось с помощью стационарной вытяжки и вентилятора.

На рис. 1б схематично показана рабочая камера для поддержания разряда при расположении металлического анода над поверхностью электролитического катода. Для этого в рабочей камере предусмотрен автоматический манипулятор, с помощью которого анод 1 перемещался в вертикальной плоскости над поверхностью электролита в ванне 4. Стрелка 3 показывает область горения разряда в парогазовом промежутке между анодом и катодом.

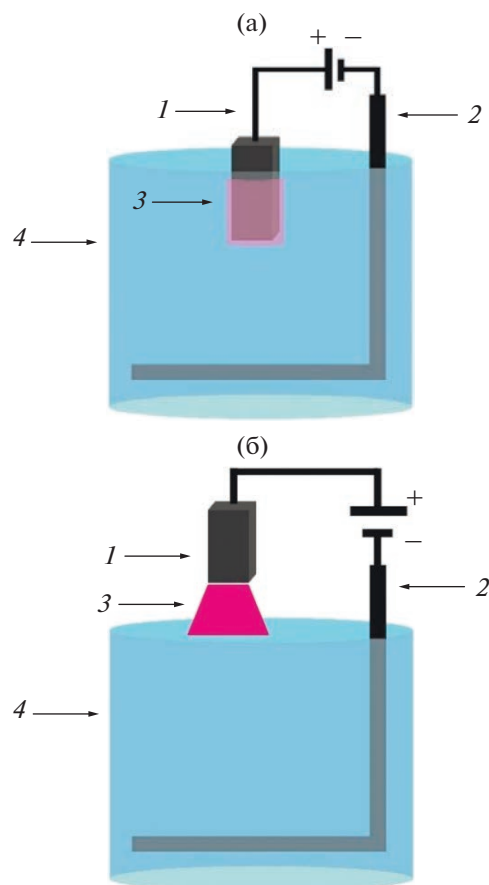


Рис. 1. Функциональная схема рабочей камеры для поддержания электрического разряда: (а) — при погружении металлического анода в электролитический катод, (б) — при расположении металлического анода над поверхностью электролитического катода.

Для питания разряда был использован регулируемый источник постоянного тока с мощностью до 40 кВт, который обеспечивает регулируемое постоянное напряжение до 4000 В при номинальном токе до 10 А. Источник состоит из низковольтного и высоковольтного регулируемых блоков, обеспечивая тем самым указанные диапазоны изменений напряжений и тока. Установка заземлена. Текущие значения тока и напряжения показывались стрелочными индикаторами на пульте источника, передавались на управляющий компьютер и контролировались оператором.

Для решения поставленных в работе задач применялись современные методы и подходы исследования.

1. Видеосъемка динамики процессов, протекающих в зоне горения разряда между металлическим и электролитическим электродами, а также образующихся при этом плазменных структур осуществлялась с помощью высокоскоростной видеокамеры марки “Casio EX-F1”. Ввиду высокой динамичности протекающих в зоне горения разряда процессов скорость съемки была выбрана 1200 и 600 кадр/с. Камера устанавливалась на штатив на расстоянии 300 мм от зоны горения разряда и передавала получаемую информацию на ЭВМ с оператором. Обработка полученных данных проводилась на персональном компьютере с установленным программным обеспечением “HX Link” и “Movavi Video Editor 14 Plus”. Дополнительное детальное исследование плазменных структур на поверхности жидкого и металлического электродов осуществлялось одновременно с помощью микроскопа “СП-52”.

2. Излучение плазмы разряда анализировалось методом эмиссионной спектроскопии на оптиковолокном спектрометре марки “PLASUS EC 150201 MC”. Регистрация излучения разряда осуществлялась с помощью коллиматора для фиксации световых лучей в диапазоне длин волн 195–1105 нм. Коллиматор подводился к зоне горения разряда на расстояние 100–200 мм. Калибровка аппаратной функции системы проводилась снятием светового излучения от лампы марки “СИРШ 6–100”. За аппаратную ширину взята ширина минимальных, одиночных и самых узких линий спектра, которая оказалась равной $\Delta\lambda_g = 1$ нм. Исследуемое излучение собиралось со всего объема формируемого разряда, поэтому оценка состава и компонентов плазмы выполнена без привязки к определенной точке разряда. Анализ полученных данных осуществлялся при помощи сопоставления исследуемого спектра с базой данных Национального института стандартов и технологий США (NIST).

3. 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 при рабочем спектральном диапазоне 3.6–4.9 мкм. Тепловизор обеспечивал фиксацию температуры поверхности электродов в калиброванном диапазоне от 4 до 2400°C. Обработка полученных значений проводилась на ЭВМ с программным обеспечением “ALTAIR v5.91.010”.

4. Исследования колебаний тока и напряжения электрического разряда производились цифровыми осциллографами “GDS-806S” и “GOS-6030”.

5. Численные расчеты осуществлялись в среде “ANSYS FLUENT 16.2”. Рассматривается протекание тока в электролитической ячейке с заземленным проводящим дном. С помощью инструментов геометрических построений была создана расчетная область $100 \times 100 \times 40$ мм³. Задача решалась методом конечных элементов, расчетная область разбивалась на элементы в виде тетраэдров. Модель представляет собой трехкомпонентную систему жидкость – воздух – пар. Для жидкой фазы учитывается наличие в электролите ионов. Берутся в расчет следующие процессы: джоулево тепловыделение, теплопроводность и конвекция, парообразование и конденсация воды, эффекты поверхностного натяжения. Система, описывающая динамику парогазовой среды и жидкости, включает уравнения неразрывности смеси, движения (импульсов), энергии и потенциала электрического поля.

В диапазоне $U = 0.1–0.4$ кВ при погруженном в электролит аноде разряд не зажигается. В области контакта электродов наблюдается процесс испарения, а затем кипения электролита с интенсивным парообразованием, что происходит как на свободной поверхности жидкости, так и вокруг металлического анода. При этом вокруг металлического анода возникает граница разделения фаз, т.е. на его поверхности образуются пузырьки, которые содержат воздух и насыщенный пар. Постоянный ток в цепи приводит в действие процессы химического выделения растворенных веществ из электролитического катода и джоулевого тепловыделения с поверхности металлического анода. В газоразрядной камере протекает процесс, характерный для электролиза. Изменяя параметры температуры и концентрации электролита, можно изменять приэлектродные процессы в нужном направлении. Пробой на границе раздела сред не возникает, так как вкладываемая в разряд мощность недостаточна для ионизации паровоздушной смеси и возникновения электронной лавины.

С увеличением напряжения более 450 В напряженность электрического поля достигает значений, достаточных для пробоя парогазового промежутка. После пробоя на образование свободных электронов в парогазовом промежутке могут вли-

ять ионизация прямым электронным ударом, ступенчатая, фото- и диссоциативная ионизация в объеме, а также плазмохимические реакции между продуктами диссоциации на границе электролита и в объеме. Разряд имеет импульсный характер с колебаниями тока в диапазоне $I = 0.2\text{--}1.2\text{ А}$, с частотой генерации до 200 Гц. Горение разряда протекает в парогазовой смеси вокруг металлического анода. В области горения разряда наблюдается процесс, аналогичный электрогидравлическому взрыву, который сопровождается акустическими хлопками, выделением конвективных парогазовых потоков, кипением и разбрызгиванием электролита. Такой характер горения разряда обусловлен тем, что в результате формирования разряда в пузырях парогазовой смеси вокруг металлического анода образуются возмущающие электролит волны, которые распространяются в различных направлениях околоэлектродного пространства.

Для стабилизации разряда применялся автоматический манипулятор, с помощью которого металлический анод вынимался из электролита. Разряд в направлении от металлического анода до электролитического катода принимает вид усеченного конуса. Свечение плазмы столба имеет желтый цвет, характерный для атомов натрия. С помощью микроскопа СП-52 установлено, что внутри конуса горят микроканалы, которые периодически появляются, перемещаются и исчезают в области межэлектродного пространства. На поверхности электролита у основания микроканалов наблюдаются катодные пятна различной геометрической формы, схожие с такими фигурами, как октаграмма или многоконечная звезда (рис. 2). Установлено, что с увеличением тока разряда количество катодных пятен, а также скорость их перемещения увеличиваются.

Для моделирования условий пробоя в парогазовой смеси вблизи металлического анода проведены численные расчеты напряженности электрического поля и распределения объемной плотности мощности джоулева тепловыделения. Схема электролитической ячейки приведена на рис. 1а. Рассматривается цилиндрический металлический электрод, частично погруженный в электролит. Диаметр металлического электрода $d_a = 6\text{ мм}$, глубина погружения $h = 10\text{ мм}$. На электрод подается постоянное напряжение U .

Моделирование электрофизических процессов в электролитической ячейке производилось в среде “ANSYS-FLUENT”. Применялась модель многофазной среды. Рассматривались три фазы: воздух, жидкий электролит и пары воды. Учитывались процессы: джоулево тепловыделение, теплопроводность и конвекция, парообразование и конденсация воды, эффекты поверхностного натяжения. В модели многофазной среды решаются следующие уравнения.

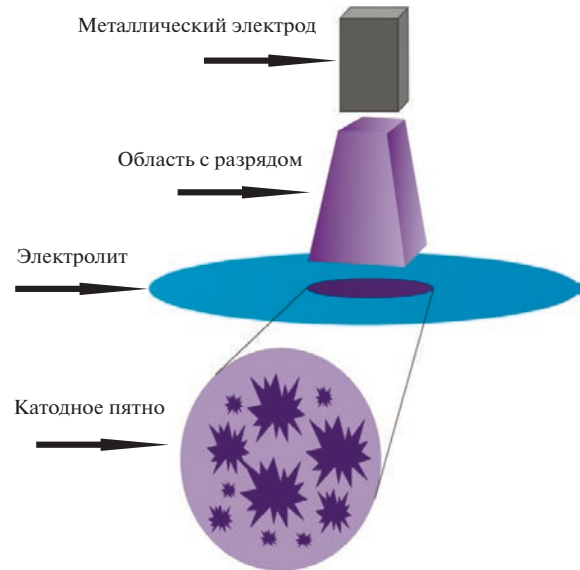


Рис. 2. Формы катодных пятен, образующихся на поверхности электролита при горении электрического разряда между металлическим анодом и жидким (неметаллическим) катодом.

Уравнение неразрывности смеси:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_m + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m) = 0, \quad (1)$$

где

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

— ее среднемассовая скорость,

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

— средняя плотность, α_k и ρ_k — объемная доля и плотность k -й компоненты,

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

Уравнения движения (уравнение импульсов):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \mathbf{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m \otimes \mathbf{v}_m) = \\ = -\nabla p + \left[\mu_m (\nabla \mathbf{v}_m + \nabla \mathbf{v}_m^T) \right] + \\ + \rho_m \mathbf{g} + \mathbf{F} + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^3 \alpha_k \rho_k \mathbf{v}_{dr,k} \otimes \mathbf{v}_{dr,k} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

где

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

— средний коэффициент вязкости смеси,

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

— дрейфовая скорость k -й компоненты; p — давление; g — ускорение свободного падения; $\mathbf{F}$ — внешние силы, действующие на элементы объема среды (например, силы поверхностного натяжения).

Уравнение энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\sum_{k=1}^3 \alpha_k \rho_k E_k \right) + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^3 \alpha_k \mathbf{v}_k (\rho_k E_k + p) \right) = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T) + S_E, \quad (3)$$

где

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

— эффективный коэффициент теплопроводности k -й компоненты, k_t — вклад в теплопроводность за счет турбулентности. В (3) для газовой фазы принимается удельная энергия

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

где h_k — удельная энтальпия, а для жидкой фазы

$$E_k = h_k,$$

S_E — объемная плотность мощности источников теплоты.

В данной модели учитывается джоулево тепловыделение

$$S_E = \mathbf{j} \cdot \mathbf{E} = \sigma E^2, \quad (4)$$

$\mathbf{j}$ — плотность тока, $\mathbf{E}$ — напряженность электрического поля, σ — удельная электропроводность электролита.

Уравнение неразрывности электрического тока

$$\text{div} \mathbf{j} = 0,$$

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}.$$

Для электростатического поля

$$\mathbf{E} = -\text{grad} \phi,$$

тогда уравнение для потенциала электрического поля

$$\text{div}(\sigma \text{grad} \phi) = 0. \quad (5)$$

Приняты следующие граничные условия для (4). На нижней проводящей пластине $\phi = 0$; на металлическом электроде $\phi = U$. На боковых диэлектрических стенках принято условие Неймана $\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$, что соответствует непротеканию тока.

Для уравнения энергии на боковых вертикальных стенках принято условие конвективного теплообмена с окружающим атмосферным возду-

хом, давление которого $p_0 = 10^5$ Па, температура $T_a = 300$ К.

Уравнения модели (1)–(5) решаются в среде ANSYS методом конечных элементов.

Расчеты проводились при значении подаваемого на электрод напряжения $U = 600$ В, удельная электропроводность электролита принята равной $\sigma = 3$ См/м. У нижней кромки электрода распределение потенциала сильно неоднородное и возникает область с большой напряженностью поля. Здесь будет максимальное джоулево тепловыделение (4), из-за чего начинается парообразование (рис. 3). На рис. 4 показано распределение плотности мощности джоулева тепловыделения по поверхности цилиндрического электрода. Видно, что имеются локальные участки с большим значением плотности мощности, вплоть до 540 ГВт/м³. Это можно объяснить тем, что локальное парообразование приводит к изменению (уменьшению) электропроводности, что ведет к усилению неоднородности поля и возникновению больших градиентов потенциала. Сильное локальное электротермическое воздействие на материал электрода при-

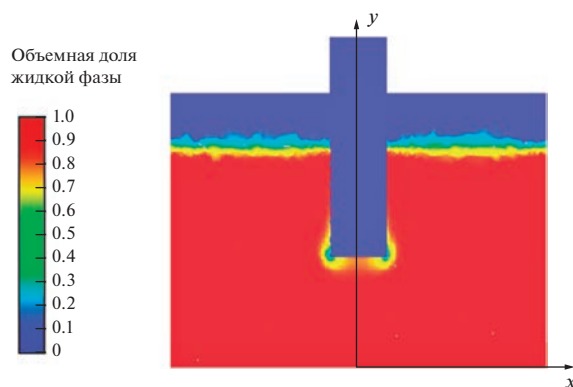


Рис. 3. Начало парообразования у нижней кромки электрода (расчет): момент времени — 16 мс после включения напряжения.

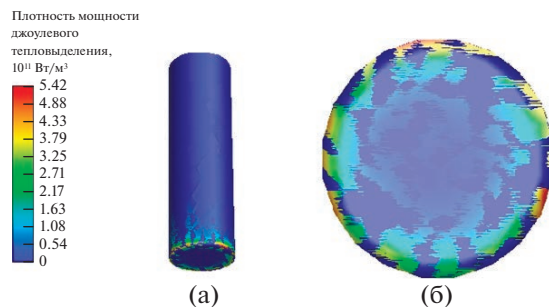


Рис. 4. Распределение плотности мощности джоулева тепловыделения по поверхности цилиндрического электрода (а) и по его нижнему торцу (б).

водит к его оплавлению и эрозии. Это, в свою очередь, способствует образованию порошка.

В процессе развития разрядных процессов вокруг погруженной части электрода образуются парожидкостная оболочка и область с пониженной электропроводностью, где происходит основное падение напряжения (рис. 5). Напряженность электрического поля вблизи торца электрода достигает значения 30 кВ/м. В этой же области происходит максимальное джоулево тепловыделение (рис. 6). Данная модель позволяет рассмотреть динамику развития быстропротекающих электрофизических процессов и рассчитать численные характеристики.

Построена вольт-амперная характеристика (ВАХ) электрического разряда между металлическим анодом и электролитическим катодом при расположении металлического электрода над поверхностью электролита при атмосферном дав-

лении (рис. 7). ВАХ разряда имеет линейно спадающий характер. Участок кривой с возрастающей ВАХ от 50 до 540 В соответствует электролизу, предшествующему разряду. Далее после стабилизации разряда напряжение уменьшается от 540 до 400 В, ток разряда меняется в интервале от 0.01 до 0.4 А. Такое поведение ВАХ разряда характерно для дугового разряда между твердыми электродами.

Анализ оптических спектров (рис. 8) показал наличие различных химических элементов в составе плазмы: Н, Na, Cl. Определение концентрации электронов в плазме проводилось по анализу контуров водородной линии H_{α} с учетом аппаратного уширения в предположении фойгтовского контура регистрируемой линии и лоренцевской составляющей, которая обусловлена линейным штарк-эффектом. Для данных контуров значения концентрации электронов представлены в таблице (электролит NaCl). Наибольшая полуширина водородной

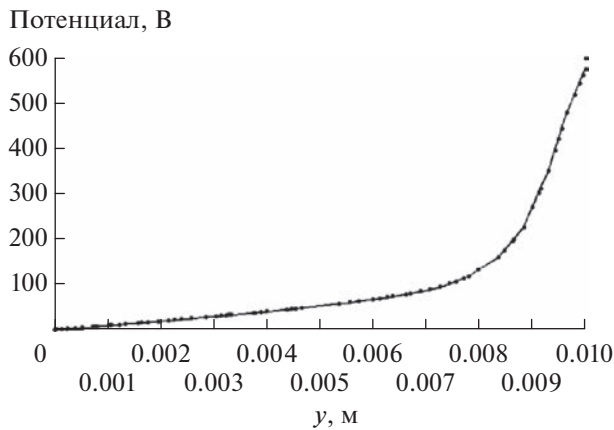


Рис. 5. Изменение потенциала вдоль осевой линии, где $y = 0$ соответствует заземленной пластине 2 на рис. 1а, $y = 0.01$ м – нижнему торцу электрода.

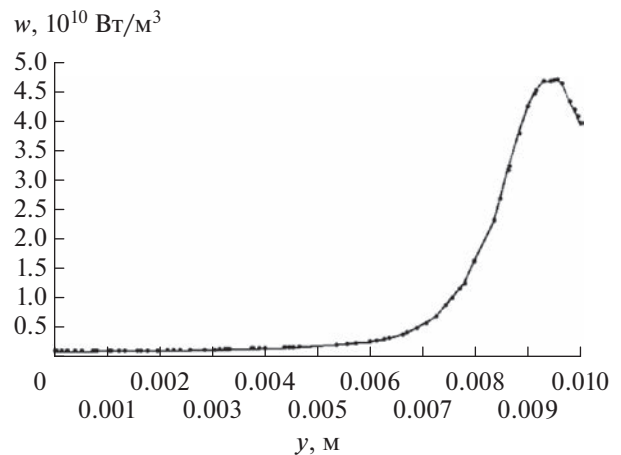


Рис. 6. Изменение объемной плотности мощности джоулева тепловыделения вдоль осевой линии.

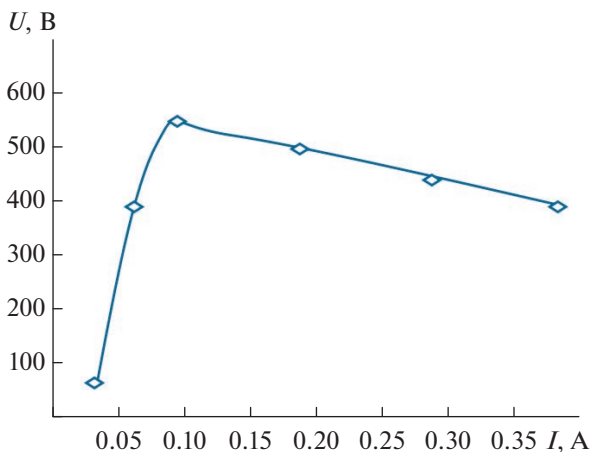


Рис. 7. ВАХ электрического разряда между металлическим анодом и электролитическим катодом.

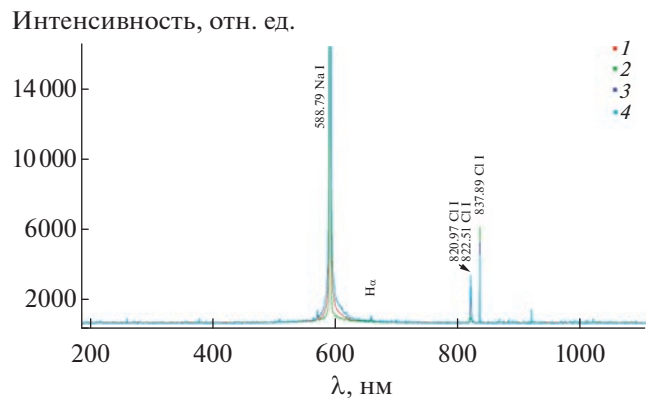


Рис. 8. Исследуемый спектр плазменного разряда между металлическим анодом и электролитическим катодом со спектральными линиями из базы NIST.

Концентрация электронов для электролита NaCl

Электролит	NaCl			
Номер эксперимента (рис. 8)	1	2	3	4
Линия из серии Бальмера	H $_{\alpha}$	H $_{\alpha}$	H $_{\alpha}$	H $_{\alpha}$
Полуширина фойгтовского контура, нм	1.3	1.3	1.4	1.4
Полуширина лоренцевской составляющей, нм	0.6	0.6	0.76	0.7
Концентрация электронов, 10 ¹⁶ см ⁻³	6.1	6.2	7.9	7.7

линии из серии Бальмера получена в эксперименте 3, следовательно, и расчет концентраций электронов в плазме для этой линии более точен. Концентрация электронов в плазменном разряде между электродами $n_e = 6.1 \times 10^{16} - 7.9 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Методом термографии исследована температура поверхности металлического анода (рис. 9а) и электролитического катода (рис. 9б) в условиях горения разряда, где синий отрезок — участок вдоль вертикальной поверхности на металлическом электроде, а красный отрезок — это участок вдоль горизонтальной поверхности на электролите. Исходя из анализа полученных данных следует, что на расстоянии от 0 до 47 мм температура поверхности металлического анода повышается от 375 до 450°C в направлении горения разряда,

затем температура стабилизируется и на расстоянии от 47 до 215 мм не меняется. Минимальная температура в системе — 375.5°C, а максимальная температура — 450.7°C (рис. 9а).

Температура поверхности электролита в области катодного пятна повышается к середине плазменного столба и достигает 220°C, затем постепенно понижается к периферии разряда. Минимальная температура в системе — 150.2°C, а максимальная температура — 220.1°C (рис. 9б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы электрофизические, спектральные и тепловые процессы, протекающие в зоне горения электрического разряда постоянного тока между металлическим анодом и жидким (неметаллическим) катодом при атмосферном давлении. Описаны типы и формы плазменных структур и пятен, образующихся на границе раздела сред, в области горения разряда. Проведены численные расчеты тепловых и электрических свойств анодной области, предшествующие разряду.

Установлено формирование разрядов постоянного тока между металлическим анодом и электролитическим катодом в форме усеченного конуса с образованием микроканалов внутри плазменного столба. Наблюдается образование катодных пятен на поверхности раствора электролита в форме октаграмм и многоконечной звезды. При погружении металлического анода в электролит разряд имеет импульсный характер с колебаниями тока в диапазоне $I = 0.2 - 1.2 \text{ А}$, с частотой генерации до 200 Гц. В конфигурации электродов, где металлический анод расположен над электролитом, ВАХ разряда имеет спадающий характер с уменьшением напряжения от 540 до 400 В при увеличении тока от 0.01 до 0.4 А.

Напряженность электрического поля вблизи торца электрода достигает значения 30 кВ/м. В этой же области происходит максимальное джоулево тепловыделение.

Анализ оптических спектров показал наличие различных химических элементов в составе плазмы: H I, Na I и Cl I. Концентрация электронов в плазменном разряде между электродами составляет $n_e = 6.1 \times 10^{16} - 7.9 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

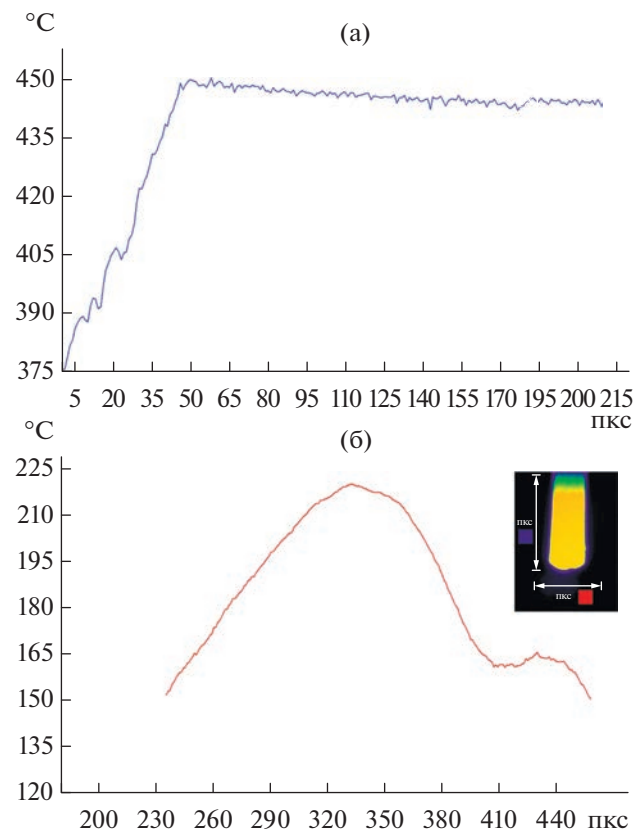


Рис. 9. Термограммы поверхности металлического анода (а) и электролитического катода (б) при горении электрического разряда.

Из анализа термограмм видно, что температура металлического анода повышается от 380 до 450°C в направлении горения разряда, а температура электролитического катода в области катодного пятна возрастает до 220°C.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (№ 22-29-0021).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bruggeman P.J., Kushner M.J., Locke B.R., Gardeniers J.G., Graham W.G., Graves D.B., Hofman-Caris R.C. et al. Plasma—Liquid Interactions: a Review and Roadmap // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2016. V. 25. P. 053002.
2. Sakiyama Y., Graves D.B., Hung-Wen Ch., Shimizu T., Morfill G.E. Plasma Chemistry Model of Surface Microdischarge in Humid Air and Dynamics of Reactive Neutral Species // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2012. V. 45. P. 425201.
3. Raizer Y.P., Allen J.E., Kisin V.I. *Gas Discharge Physics*. Berlin: Springer, 1997. 449 p.
4. Гайсин А.Ф., Сон Э.Е., Ефимов А.В., Гильмутдинов А.Х., Кашапов Н.Ф. Спектральная диагностика плазмы разряда между металлическим катодом и жидким анодом // *ТВТ*. 2017. Т. 55. № 3. С. 472.
5. Хлюстова А.В. Динамическая модель подводного разряда // *Письма в ЖТФ*. 2021. Т. 47. С. 38.
6. Kashapov N.F., Kashapov R.N., Kashapov L.N. Influence of the Electrolytic Cathode Temperature on the Self-sustaining Mechanism of Plasma-electrolyte Discharge // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2018. V. 51. P. 494003.
7. Курко Д.Л. Исследование приэлектродной плазмы и поверхности электродов при разряде в электролите // *Физика плазмы*. 2020. Т. 46. № 6. С. 495.
8. Andre P., Barinov Y., Faure G., Kaplan V., Lefort A., Shkol'nik S., Vacher D. Experimental Study of Discharge with Liquid Non-metallic (Tap-water) Electrodes in Air at Atmospheric Pressure // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2001. V. 34. P. 3456.
9. Желтухин В.С., Гайсин Ал.Ф., Петряков С.Ю. Механизм пробоя высокочастотного разряда со струйными электролитическими электродами // *Письма в ЖТФ*. 2022. Т. 48. С. 24.
10. Гайсин Ал.Ф., Сон Э.Е., Петряков С.Ю. Высокочастотный емкостной разряд с проточными жидкими электродами при понижении давления // *Физика плазмы*. 2017. Т. 43. № 7. С. 625.
11. Сон Э.Е., Суворов И.Ф., Какауров С.В., Гайсин А.Ф., Самитова Г.Т., Соловьева Т.Л., Юдин А.С., Рахлецова Т.В. Электрические разряды с жидкими электродами и их применение для обеззараживания вод // *ТВТ*. 2014. Т. 52. № 4. С. 512.
12. Хафизов А.А., Валиев Р.И., Багаутдинова Л.Н., Гайсин Аз.Ф., Гайсин Ал.Ф., Гайсин Ф.М., Сон Э.Е., Фахрутдинова И.Т. Электрический разряд переменного тока в однопроцентном растворе хлорида натрия в дистиллированной воде при пониженных давлениях // *ТВТ*. 2022. Т. 60. № 4. С. 625.
13. Валиев Р.И., Хафизов А.А., Багаутдинова Л.Н., Гайсин Ф.М., Басыров Р.Ш., Гайсин Аз.Ф., Гайсин Ал.Ф. Электрические разряды переменного тока в газожидкостной среде раствора хлорида натрия при атмосферном давлении // *ТВТ*. 2021. Т. 59. № 4. С. 634.
14. Багаутдинова Л.Н., Садриев Р.Ш., Гайсин А.Ф., Мاستюков Ш.Ч., Гайсин Ф.М., Фахрутдинова И.Т., Леушка М.А., Гайсин А.Ф. Некоторые особенности диэлектрического барьерного разряда с жидким и твердым электродами // *ТВТ*. 2019. Т. 57. № 6. С. 953.
15. Галимзянов И.И., Гайсин А.Ф., Фахрутдинова И.Т., Шакирова Э.Ф., Ахатов М.Ф., Каюмов Р.Р. Некоторые особенности развития электрического разряда между струйным анодом и жидким катодом // *ТВТ*. 2018. Т. 56. № 2. С. 306.
16. Гайсин А.Ф., Гайсин Ф.М., Гайсин А.Ф., Багаутдинова Л.Н., Садриев Р.Ш., Галимзянов И.И., Гильмутдинов А.Х., Шакирова Э.Ф. Термограммы высокочастотного емкостного разряда между твердым и жидким электродами // *ТВТ*. 2018. Т. 56. № 6. С. 891.
17. Гайсин А.Ф. Двухмерное численное моделирование объемного разряда с жидким анодом // *ТВТ*. 2017. Т. 55. № 1. С. 141.
18. Сон Э.Е., Гайсин А.Ф., Леушка М.А., Гайсин А.Ф., Садриев Р.Ш., Гайсин Ф.М. Некоторые особенности электрического разряда между твердым электродом и технической водой // *ТВТ*. 2016. Т. 54. № 1. С. 29.
19. Гайсин А.Ф. Исследование воздействия низкотемпературной плазмы парогазовых разрядов с электролитическими электродами при пониженном давлении на изделие сложной геометрической формы // *Физика и химия обработки материалов*. 2016. № 3. С. 22.
20. Гайсин А.Ф., Гильмутдинов А.Х., Мирханов Д.Н. Электролитно-плазменная обработка поверхности детали, изготовленной с применением аддитивной технологии // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2018. № 2 (752). С. 69.
21. Гайсин А.Ф., Гильмутдинов А.Х. Электролитно-плазменная обработка изделия, изготовленного с применением аддитивной технологии // *Физика и химия обработки материалов*. 2020. № 2. С. 28.
22. Агафонов А.В., Сироткин Н.А., Титов В.А., Хлюстова А.В. Подводная низкотемпературная плазма как инструмент синтеза неорганических наноматериалов // *Журн. неорг. химии*. 2022. Т. 67. № 3. С. 271.
23. Рыбкин В.В., Смирнов С.А., Титов В.А., Аржаков Д.А. Характеристики электронов и колебательных распределений молекул в разряде постоянного тока атмосферного давления в воздухе с жидким катодом // *ТВТ*. 2010. Т. 48. № 4. С. 498.
24. Курко Д.Л., Савелов А.С. Характеристики капиллярного разряда при добавлении в плазму атомов металлов // *ТВТ*. 2015. Т. 53. № 6. С. 953.
25. Тазмеев Г.Х., Тимеркаев Б.А., Тазмеев Х.К., Мифтахов М.Н. Особенности переноса вещества и зарядов в газоразрядную плазму из водного раствора хлорида натрия, служащего в качестве катода // *ХВЭ*. 2018. Т. 52. № 1. С. 83.
26. Тазмеев Г.Х., Тимеркаев Б.А., Тазмеев Х.К. Исследование газового разряда постоянного тока с находящимся в водном потоке медным катодом // *Физика плазмы*. 2017. Т. 43. № 7. С. 641.
27. Тазмеев Х.К., Тазмеев Б.Х. Некоторые особенности горизонтально ориентированной слаботочной электрической дуги в воздухе // *Физика плазмы*. 2016. Т. 42. № 1. С. 93.
28. Хлюстова А.В., Максимов А.И. Плазменно-окислительная деструкция органических красителей в растворе при совместном действии подводных разрядов и озона // *ХВЭ*. 2013. Т. 47. № 3. С. 237.