

УДК 533.9

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЯД МЕЖДУ МЕТАЛЛИЧЕСКИМ КАТОДОМ И ЖИДКИМ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИМ АНОДОМ

© 2024 г. Р. Р. Каюмов^{a, *}, А. И. Купутдинова^a, Д. Н. Мирханов^a, Ал. Ф. Гайсин^b

^a Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

^b Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

* e-mail: almaz87@mail.ru

Поступила в редакцию 22.09.2023 г.

После доработки 22.11.2023 г.

Принята к публикации 25.11.2023 г.

Исследована газоразрядная плазма, генерируемая между металлическим катодом и жидким неметаллическим анодом при атмосферном давлении. Зажигание разряда осуществляется путем погружения металлического электрода в электролит. Рассмотрены типы и формы генерируемых в межэлектродном промежутке плазменных структур, их электрофизические параметры. Представлены результаты термографического анализа поверхности электродов в условиях горения разряда. С помощью эмиссионной спектроскопии исследованы состав плазмы, концентрация электронов и температура тяжелой компоненты.

Ключевые слова: газоразрядная плазма, плазменно-жидкостная система, электрический разряд, численный метод, электролит, эмиссионная спектроскопия, термограмма

DOI: 10.31857/S0367292124010096 EDN: SJLQOP

1. ВВЕДЕНИЕ

Газоразрядная плазма традиционно ассоциируется с газовой фазой, однако разряды могут возникать во всех термодинамических состояниях. Плазменные разряды, формирующиеся в жидкостях и взаимодействующие с ними, представляют собой интенсивно развивающуюся область научного исследования и приложений.

Первым научным трудом в этой области является работа Генри Кавендиша “Опыты в воздухе” 1785 года о взаимодействии плазмы электрической искры с жидкостью и получении азотистой кислоты в воздухе.

Эксперименты по взаимодействию плазмы и жидкости в рамках электрохимии насчитывают более 100 лет. Примерно 30 лет назад основное внимание уделялось электролизу и изучению пробоя диэлектрических жидкостей для высоковольтного переключения тока. За этими работами последовал сильный акцент на экологические исследования на основании того, что плазма в жидкостях и в контакте с ними является богатым источником активных молекул и УФ-излучения [1].

В течение 15 лет фокус исследований взаимодействия плазмы с жидкостями расширился и стал охватывать различные области применения, включая электрохимию, аналитическую химию, восстано-

вление окружающей среды (очистка и дезинфекция воды), синтез материалов (наночастицы, металлические порошки), обработка материалов (удаление заусенец, плазменная полировка, активация полимеров), химический синтез (перекиси водорода H_2O_2 и молекулярного водорода H_2), стерилизация и разнообразное медицинское применение, включая плазменную обработку биоматериалов, ускоренное заживление ран, абляцию биотканей и коагуляцию крови.

Эти возможности поставили перед плазменным сообществом междисциплинарные научные вопросы. В дополнение к специализированным обзорным статьям были опубликованы два более широких обзора, посвященных приложениям результатов взаимодействия плазмы с жидкостями [2, 3].

Электрические разряды и плазма, взаимодействующие с жидкостью, могут генерироваться источниками постоянного тока [4], переменного тока низких частот [5], генераторами высокочастотных токов на частоте 13,56 МГц [6, 7] и микроволновым возбуждением в диапазоне сверхвысоких частот [8].

Существует множество конфигураций рабочих камер для поддержания плазмы электрических разрядов с жидкими неметаллическими электродами с различными рабочими характеристиками; их можно разделить на три основные категории:

- разряды внутри жидкости [9];
- разряды в газовой фазе над поверхностью жидкости, в том числе когда жидкость является проводящим электродом [10];
- разряды в многофазных средах, в том числе внутри пузырьков, парогазовой смеси, аэрозолях и пенах [11].

Плазму в жидкостях исследуют визуально и с помощью оптической эмиссионной спектроскопии [12]. Данные методы позволяют измерить основные параметры плазмы, включая типы и формы структур, состав плазмы, температуру и плотность ее компонентов.

Много работ посвящено численному моделированию процессов в разрядах, однако остается много нерешенных вопросов о взаимодействии плазмы с жидкостями, в том числе:

- пробой и механика процессов на границе раздела сред;
- физико-химические процессы при плазменно-жидкостном взаимодействии.

Другая проблема — это междисциплинарная связь с широким спектром химических веществ и физических процессов, включая различные частицы, ионы, электроны, УФ-излучение, электрические поля, тепловые потоки нейтрального газа через границу газ–жидкость. Все эти отдельные компоненты взаимодействия плазмы с жидкостью обычно изучают с помощью разных методов.

Несмотря на множество нерешенных фундаментальных вопросов, над которыми работают специалисты различных научных школ, плазменно-жидкостные технологии успешно внедряют в промышленность. Одним из примеров такого успешного внедрения является электролитно-плазменная полировка внешней и внутренней поверхности металлических изделий [13–15].

Электролитно-плазменный метод позволяет проводить обработку изделий по следующим основным направлениям:

- полировка сложно-профильных поверхностей;
- зачистка заусенцев;
- декоративная полировка;
- очистка поверхностей от загрязнений и ее подготовка к нанесению покрытий.

Эффективность применения электролитно-плазменной обработки существенно зависит от множества параметров, которые можно обобщить в три основных пункта: тип обрабатываемого металла, свойства электролита и режимы обработки. Как

показывает практика, режимы, эффективные при обработке одних металлов, часто не подходят для других металлов и сплавов.

В предыдущей работе [16] нашей научной группы были представлены результаты исследования электрического разряда между металлическим анодом и жидким неметаллическим катодом при атмосферном давлении. Установлены типы и формы плазменных структур, формирующихся в межэлектродном промежутке, электрофизические параметры. Получены данные о составе плазмы разряда, концентрации электронов и тяжелой компоненте. Представлены результаты численных расчетов протекания тока в электролитической ячейке и механизмы начальной стадии разряда.

Целью данной работы является исследование характеристик электрического разряда между металлическим катодом и жидким неметаллическим анодом.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Зажигание и исследование электрического разряда в рассматриваемой конфигурации электродов осуществлялось на установке (рис. 1), где 1 — металлический катод; 2 — область с разрядом; 3 — электролитическая ванна; 4 — металлическая пластина из меди марки М1 для подвода положительного потенциала к электролиту. В качестве металлического катода применялся металлический стержень из алюминия марки АМЦ-40, а в качестве жидкого неметаллического анода использовался 3%-ный раствор хлорида натрия (NaCl) в очищенной водопроводной воде.

Металлический катод предварительно погружали в электролит и перемещали в вертикальной плоскости на расстояние 15 мм с помощью автоматического манипулятора. Для контроля температуры раствора электролита в ванне предусмотрен термостат. Термостатирование осуществляли с помощью циркуляционного охладителя рефрижераторного типа.

Обновление электролита в ванне осуществляли 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 проводили с помощью стационарной вытяжки и вентилятора.

Экспериментальная установка оснащена высоковольтным генератором мощностью 40 кВт с изменяемым напряжением до 4 кВ при номинальном

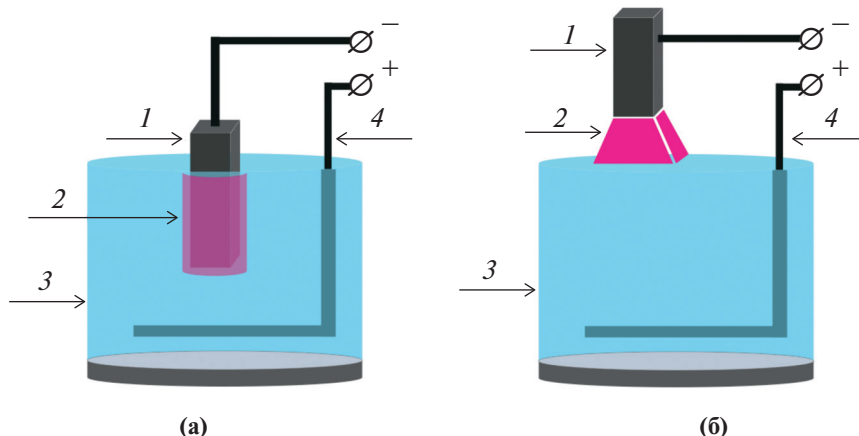


Рис. 1. Функциональная схема экспериментальной установки для зажигания электрического разряда между металлическим катодом и жидким (неметаллическим) анодом.

токе до 10 А, который обеспечивает питание тока разряда, диагностического и вспомогательного оборудования.

Генератор электрического питания преобразует и регулирует сетевое напряжение. Высоковольтный и низковольтный регулируемые блоки обеспечивают указанные диапазоны устанавливаемых напряжений и тока. Установка заземлена. Текущие значения тока и напряжения показывают стрелочные индикаторы на пульте источника, далее эти показания передаются на управляющий компьютер и контролируются оператором.

Эксперименты проводились при устанавливаемых параметрах напряжения $U = 0.05\text{--}0.9$ кВ, диаметр металлического катода $d_k = 6$ мм, межэлектродное расстояние между металлическим катодом и электролитическим анодом $i = 4$ мм, глубина погружения металлического электрода в электролит $h = 10$ мм, удельная электропроводность электролита $\sigma = 0.1\text{--}0.12$ Ом $^{-1}$ ·см $^{-1}$ и температуры жидкого (неметаллического) анода $T_a = 20\text{--}24$ °С.

В изысканиях использовали современное диагностическое оборудование, применяли эффективные методы и подходы исследований.

Видеосъемка динамики протекающих в зоне горения разряда процессов, а также образующихся плазменных структур осуществляли с помощью высокоскоростной видеокамеры марки Casio EX-F1. Ввиду высокой динамичности протекающих в зоне горения разряда процессов скорость съемки была выбрана 1200 и 600 кадров в секунду. В 300 мм от зоны горения разряда устанавливали на штатив камеру, которая передавала получаемую информацию на ЭВМ оператору. Обработка данных проводилась на персональном компьютере. Дополнительное детальное исследование анодных и катодных пятен на

поверхности жидкого и металлического электродов проводили одновременно с помощью микроскопа СП-52.

Излучение плазмы разряда вели методом эмиссионной спектроскопии на оптико-волоконном спектрометре марки PLASUS EC 150201 MC. Излучение разряда регистрировали с помощью коллиматора для фиксации световых лучей в диапазоне длин волн 195–1105 нм. Коллиматор подвели к зоне горения разряда на расстояние 100–200 мм. Исследуемое излучение собирали со всего объема формируемого разряда, поэтому оценка состава и компонентов плазмы выполнена без привязки к определенной точке на разряде. Анализ полученных данных делали, сопоставляя исследуемый спектр с базой данных Национального института стандартов и технологий (США).

Для анализа распределения температуры исследуемой поверхности металлического и электролитического электродов в процессе горения разряда использовалась тепловизионная камера (тепловизор) FLIRA6500SC с пространственным разрешением детектора 640×512 пикселей при рабочем спектральном диапазоне 3,6–4,9 мкм. Тепловизор фиксировал температуру поверхности электродов в калиброванном диапазоне 4–2400 °С. Для калибровки тепловизионной камеры использовали многоволновый пирометр. Его применение обусловлено тем, что при горении разряда часто образуются оксидная пленка и окалина, которые могут приводить к погрешностям измерений температуры. Обработка полученных значений проводили на компьютере.

Исследование пульсаций, колебаний тока и напряжения разряда осуществляли с помощью цифровых осциллографов GDS-806S и GOS-6030. Для обеспечения контроля электрофизических пара-

метров в момент зажигания и поддержания разряда к осциллографам подключали устройство на фото-диодах с микросхемой для регистрации оптического излучения разряда.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В начальный момент электрический разряд инициализируют путем погружения алюминиевого катода в электролит на глубину 10 мм. После подачи потенциала на электроды ($U = 0.05\text{--}0.25$ кВ) в зоне контакта металлического и жидкого электродов наблюдали процесс образования пузырей с выделением конвективных паровоздушных потоков, что обусловлено нагревом металлического катода за счет протекающего постоянного тока в цепи. Это запускает процессы джоулевого тепловыделения с поверхности металлического катода и физико-химического выделения растворенных веществ из электролита.

Вокруг алюминиевого катода образуется парогазовая оболочка. За счет термоэлектронной эмиссии протекают процессы испускания электронов с поверхности нагретого катода и их движения в направлении анода. Таким образом, на границе электродов взаимодействуют три среды: твердый металлический электрод (катод), паровоздушная оболочка вокруг электрода и электролит.

В зоне контакта электродов протекает процесс, характерный для электролиза, что определяется протеканием электрического тока в жидкости им имеющимися в электролите ионами. Варьируя параметрами температуры, состава и концентрации электролита, можно менять протекание электродных процессов в желательном направлении.

Горения разряда при данных устанавливаемых параметрах не наблюдается, так как формируемое у поверхности металлического катода электронное облако недостаточно для формирования лавины и запуска процесса ионизации в паровоздушной оболочке.

С увеличением напряжения выше 300 В характер процессов, протекающих на межэлектродной границе, меняется. Раствор электролита вокруг металлического катода начинает кипеть. В определенный момент напряженность электрического поля достигает значения, достаточного для образования электронной лавины и последующего пробоя парогазового промежутка между электродами.

В парогазовой оболочке наблюдаются микроразряды, которые случайным образом появляются и затухают в разных областях. Электрический разряд формируется в виде импульсов тока ($I = 2\text{--}12$ А). Такое “поведение” разряда обусловлено тем, что на

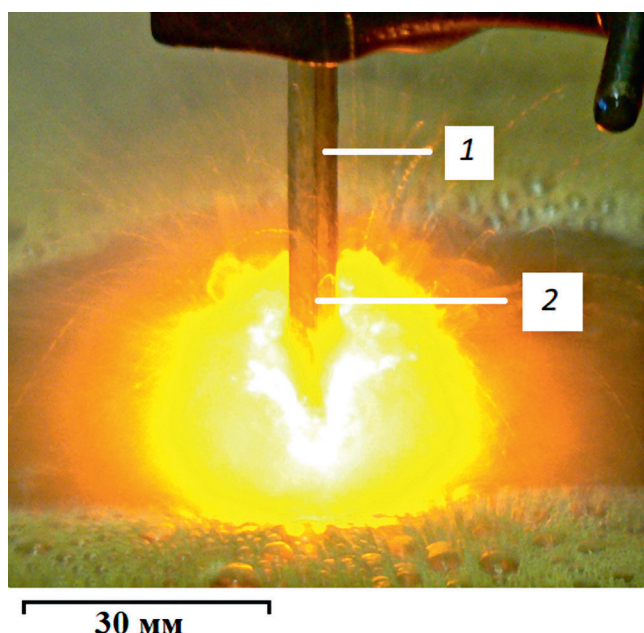


Рис. 2. Фотография электрического разряда между металлическим катодом и жидким (неметаллическим) анодом при атмосферном давлении. Цифры 1 и 2 соответствуют областям, обозначенным на рис. 3.

границе взаимодействия сред протекают процессы, аналогичные электрогидравлическому взрыву. Условное разделение границ фаз: твердый электрод — парогазовая оболочка — электролит сильно, неустойчиво и хаотично меняется, что приводит к горению разряда в виде импульсов тока.

После пробоя и формирования разряда металлический катод поднимают с помощью автоматического манипулятора над поверхностью жидкого анода. Разряд желтого цвета горит в объемной (диффузной) форме (рис. 2), что характерно при наличии атомов натрия.

Часть катода находится внутри светящейся области, разряд как бы укутывает его. Максимальная температура наблюдается на части катода, окутанной разрядом (рис. 3).

В этой части температура катода практически постоянна за счет притока тепла от разряда. От нее в направлении к точке закрепления катода температура поверхности уменьшается практически по линейному закону вследствие теплопроводности. Случайные отклонения от линейного графика вызваны, по-видимому, попаданием в поле зрения коллиматора горячих брызг от разряда (см. рис. 2).

В межэлектродном промежутке на расстоянии $l = 81\text{--}95$ мм температура падает до 100°C , что связано с нагревом паров электролита, поднимающихся с поверхности жидкого анода. График (см. рис. 3)

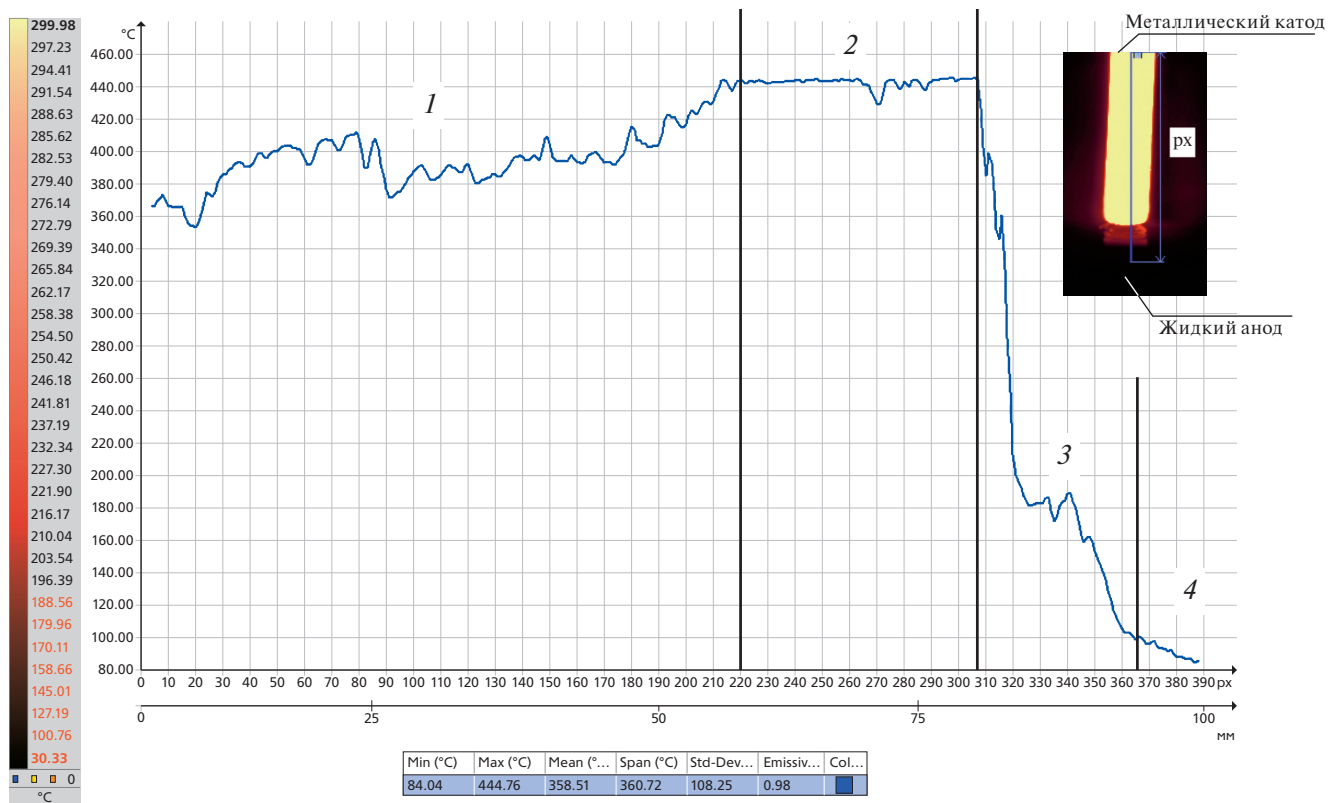


Рис. 3. Термограмма поверхности металлического катода и жидкого (неметаллического) анода в условиях горения электрического разряда: 1 – поверхность металлического катода вне разряда, 2 – поверхность металлического катода в области разряда, 3 – межэлектродный промежуток, 4 – поверхность жидкого анода.

при $l = 95\text{--}100$ мм соответствует температуре вдоль поверхности жидкого анода, то есть расстоянию $0\text{--}5$ мм от центра разряда (l – это путь в фокальной плоскости коллиматора при сканировании объекта исследования). Температура поверхности электролита с удалением от разряда падает до 85°C вследствие теплопроводности и конвективного теплопереноса в электролите.

Построена вольтамперная характеристика (ВАХ) разряда после подъема и фиксации положения металлического катода над поверхностью жидкого анода (рис. 4). Из графика видно, что в интервале тока от $75\text{--}150$ мА величина U растет, а с возрастанием от 150 до 300 мА ВАХ разряда имеет падающий характер. Такое развитие объясняется тем, что с увеличением тока меняется баланс процессов рождения и гибели электронов в положительном столбе плазмы.

При зажигании разряда с ростом тока вначале увеличиваются концентрация электронов и проводимость плазмы, что ведет к росту напряжения. Затем, с увеличением тока и вкладываемой в разряд мощности, растут потери энергии на диссоциацию молекул, возбуждение электронных состояний атомов и молекул, колебательных и вращательных сте-

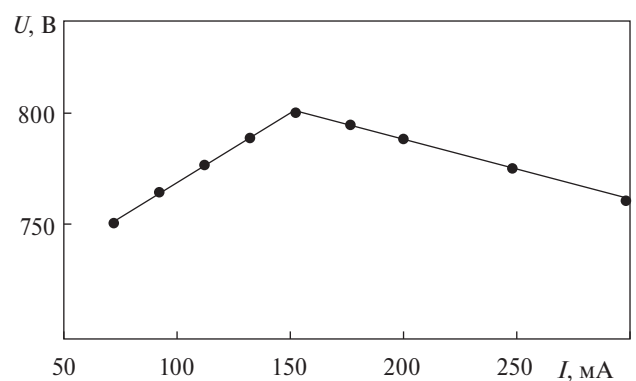


Рис. 4. Вольтамперная характеристика электрического разряда между металлическим катодом и жидким неметаллическим анодом.

пеней свободы молекул и увеличение плотности отрицательных ионов. Это приводит к уменьшению концентрации электронов и, соответственно, к уменьшению доли электронной и увеличению доли ионной проводимости тока в разряде, что эквивалентно увеличению сопротивления разряда и напряжения.

Для оценки состава, концентрации электронов и тяжелой компоненты плазмы проведен спектраль-

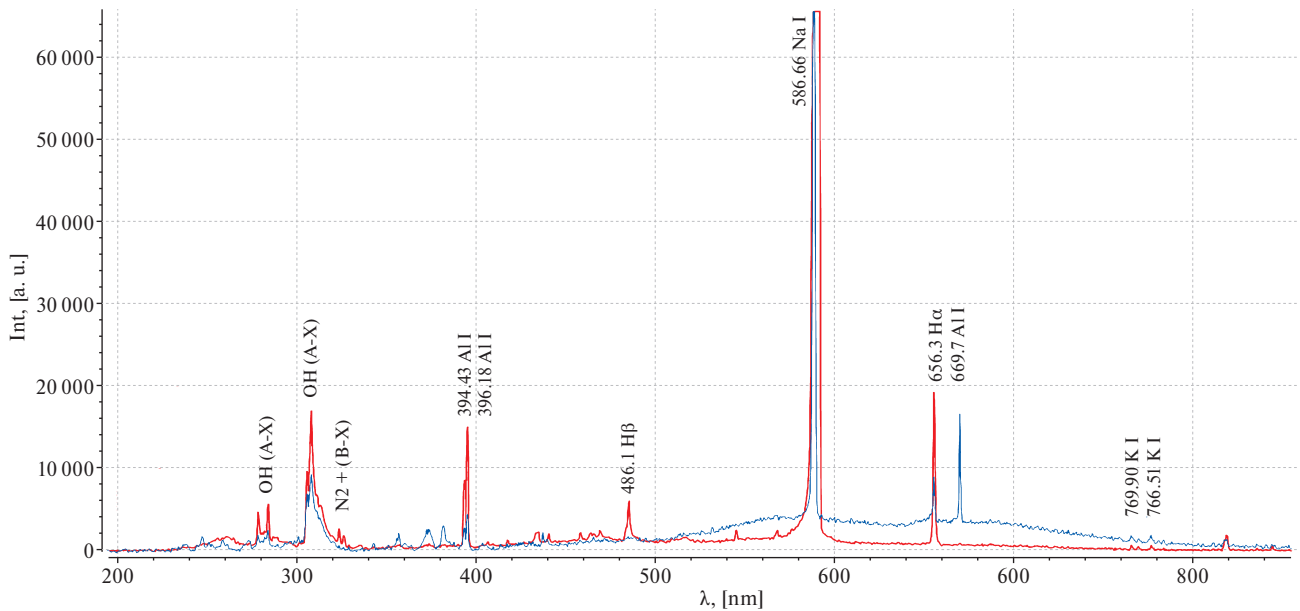


Рис. 5. Спектр электрического разряда между металлическим катодом и жидким анодом (синий график) и металлическим анодом и жидким катодом (красный график) при атмосферном давлении.

Таблица 1. Элементный состав плазмы для режимов 1 и 2

Режим	Эксперимент	N2+	Молекулы
1	Металлический анод и жидкий катод	H I, Na I, Al I, K I	OH (A-X), N ₂ ⁺ (B-X)
2	Металлический катод и жидкий анод	H I, Na I, Al I, K I	OH (A-X), N ₂ ⁺ (B-X)

ный анализ излучения электрического разряда между металлическим катодом и жидким (неметаллическим) анодом. Проведено также сравнение полученных данных с результатами предыдущей работы [16] по оценке компонентов плазмы разряда в конфигурации между металлическим анодом и жидким неметаллическим катодом.

Исходя из анализа спектра (рис. 5), следует, что в наблюдаемом участке плазмы присутствуют молекулы, атомы и ионы различных элементов (табл. 1).

Аппаратное уширение в исследуемом спектре проверено по атомарной линии Al I (669.7 нм). Минимальная ширина оптически тонких и самых узких линий $\Delta\lambda_G \approx 1$ нм. Она и принята за аппаратную ширину ($\Delta\lambda_G$ — полуширина гауссовского контура).

Оценка концентрации электронов в плазме для спектра рассчитывалась по полуширине нескольких водородных линий из серии Бальмера. Измеренная полуширина $\Delta\lambda_F$ (полуширина фойгтовского контура) определялась по линиям H_α и H_β .

С учетом аппаратной составляющей уширение линий вследствие эффектов давления и линейного штарк-эффекта определялась величина $\Delta\lambda_L$ — полуширина лоренцевского контура по формуле [17]

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

Концентрация электронов определялась по соотношению из справочника [18]:

$$n_e = 10^{13} (\Delta\lambda_L)^2 \left[C_0(T) + \sum_{n=1}^m C_n(T) (\ln \Delta\lambda_L)^n \right],$$

где $C_n(T)$ — из справочника [18] для соответствующей спектральной линии водорода из серии Бальмера (табл. 2).

Расчет концентрации электронов проводили по водородным линиям из серии Бальмера, где наиболее четко видны H_α и H_β (табл. 3).

Таблица 2. Коэффициенты для расчета концентрации электронов по спектрам излучения водородных линий из серии Бальмера

Коэффициент C_n	Линия атомарного водорода H_α	Линия атомарного водорода H_β
C_0	671,4	36,56
C_1	−227,5	−1,45
C_2	44,72	−0,109
C_3	−2,325	0,005

Таблица 3. Концентрация электронов в плазменном разряде между электродами для режимов 1 и 2

Измеряемая и расчетная величина	Эксперимент			
	Металлический анод и жидкий катод		Металлический катод и жидкий анод	
Режим	1		2	
Линии серии Бальмера	H_α	H_β	H_α	H_β
Полуширина фойгтовского контура, нм	1,36	1,59	1,12	1,01
Полуширина с учетом лоренцевой составляющей, нм	0,601491	0,934406	0,215116	0,018635
Концентрация электронов, см ⁻³	Не оценивалось	9,37·10 ¹⁵	1,648·10 ¹⁶	Не оценивалось

Рассчитывая концентрацию электронов в режиме 1 по линиям H_α и H_β , выбирали спектр, у которого наибольшая ширина фойгтовского контура, так как там наибольшее отклонение от аппаратного уширения, а следовательно, и бóльшая точность. Учитывая аппаратное уширение для режима 1, выбрали наиболее широкую линию, а именно H_β с концентраций $n_e = 9,37 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Для режима 2 концентрация электронов взята по наиболее широкой линии H_α , и она составила $n_e = 1,648 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате теоретических и экспериментальных исследований электрического разряда между металлическим катодом и жидким неметаллическим анодом при атмосферном давлении установлено, что разряд формируется в объемной диффузной форме. В конфигурации, когда металлический катод погружен в электролит, разряд горит хаотично в парогазовом промежутке в форме микроканалов с импульсом тока от 2 до 12 А.

При расположении металлического катода над электролитом ВАХ разряда в диапазоне $I = 75\text{—}150$ мА имеет возрастающий характер, а от 150 до 300 мА величина U падает.

Температура металлического катода в условиях горения разряда возрастает с 84 до 445 °С, температура газа в межэлектродном промежутке меняется в диапазоне 100—390 °С, а температура жидкого анода варьирует: $T_a = 85\text{—}99$ °С.

В наблюдаемом участке плазмы налицо различные элементы, в том числе атомы водорода H I, натрия Na I, алюминия Al I, калия K I, а также молекулы гидроксила OH (A-X) и ионы азота N₂⁺ (B-X). Концентрация электронов, рассчитанная по уширению водородных линий серии Бальмера, составляет величину $n_e \approx 1,6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-30062).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sato M., Ohgiyama T., Clements J.S. // IEEE Trans. Ind. Appl. 1996. V. 32 P. 106.
DOI: 10.1109/28.485820

2. Locke B.R., Sato M., Sunka P., Hofman M.R., Chang J.S // Ind. Eng. Chem. Res. 2006. V. 45. P. 882.

3. Bruggeman P.J., Leys C. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. V. 42. P. 053001.

4. Сироткин Н.А., Титов В.А. // Прикладная физика. 2016. № 6. С. 25.

5. Валиев Р.И., Хафизов А.А., Багаутдинова Л.Н., Гайсин Ф.М., Басыров Р.Ш., Гайсин Аз.Ф., Гайсин Ал.Ф., Гайсин Ф.М., Желтухин В.С., Сон Э.Е. // Теплофизика высоких температур. 2021. Т. 59. № 4. С. 634.

6. Гайсин Ал.Ф., Гайсин Ф.М., Желтухин В.С., Сон Э.Е. // Физика плазмы. 2022. Т. 48. № 1. С. 71.

7. Гайсин Ал.Ф., Сон Э.Е., Петряков С.Ю. // Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 7. С. 625.

8. Аверин К.А., Лебедев Ю.А., Шахатов В.А. // Прикладная физика. 2016. № 2. С. 41.

9. Акишев Ю.С., Грушин М.Е., Каральник В.Б., Мониц А.Е., Панькин М.В., Трушкин Н.И., Холоденко В.П., Чугунов В.А., Жиркова Н.А., Ирхина И.А., Кобзев Е.Н. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. № 12. С. 1142.

10. Баринов Ю.А., Школьник С.М. // Журнал технической физики. 2016. Т. 86. № 11. С. 155.

11. Самитова Г.Т., Гайсин Аз.Ф., Мустафин Т.Б., Гайсин Ал.Ф., Сон Э.Е., Весельев Д.А., Гайсин Ф.М. // Теплофизика высоких температур. 2011. Т. 49. № 5. С. 788.

12. Гайсин А.Ф., Сон Э.Е., Ефимов А.В., Гильмутдинов А.Х., Кашапов Н.Ф. // Теплофизика высоких температур. 2017. Т. 55. № 3. С. 472.

13. Гайсин А.Ф., Каюмов Р.Р., Кунутдинова А.И., Марданов Р.Р. // Физика и химия обработки материалов. 2023. № 1. С. 37.

14. Гайсин А.Ф., Гильмутдинов А.Х. // Физика и химия обработки материалов. 2020. № 2. С. 28.

15. Гайсин А.Ф., Гильмутдинов А.Х., Мирханов Д.Н. // Металловедение и термическая обработка металлов. 2018. № 2. С. 69.
16. Петряков С.Ю., Мирханов Д.Н., Гайсин Ал.Ф., Басыров Р.Ш., Кашанов Н.Ф. // Прикладная механика и техническая физика. 2022. Т. 63. № 5. С. 20.
17. Kielkopf J.F. // Journal of the Optical Society of America. 1973. V. 63. P. 987.
DOI: 10.1364/JOSA.63.000987
18. Елисеев В.В., Касабов Г.А. Спектроскопические таблицы для низкотемпературной плазмы. М.: Атомиздат, 1973.

ELECTRIC DISCHARGE BETWEEN A METAL CATHODE AND A LIQUID NON-METAL ANODE

R. R. Kayumov^{a, *}, A. I. Kuputdinova^a, D.N. Mirkhanov^a, Al. F. Gaisin^b

^a Kazan National Research Technical University, Kazan, Russia

^b Joint Institute of High Temperatures RAS, Moscow, Russia

* e-mail:almaz87@mail.ru

Gas-discharge plasma generated between a metal cathode and a liquid non-metallic anode at atmospheric pressure has been studied. The discharge is ignited by immersing the metal electrode in the electrolyte. The types and shapes of plasma structures generated in the interelectrode gap and their electrical parameters are considered. The results of thermographic analysis of the electrode surface under discharge conditions are presented. Using emission spectroscopy, the plasma composition, electron concentration and temperature of the heavy component were studied.

Keywords: gas-discharge plasma, plasma-liquid system, electric discharge, numerical method, electrolyte, emission spectroscopy, thermogram