

## Электрофизические и тепловые свойства разряда с жидким (неметаллическим) анодом

© Э.Р. Бельгибаев<sup>1</sup>, А.А. Хафизов<sup>2</sup>, Р.Р. Каюмов<sup>1</sup>, А.Ф. Гайсин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ, Казань, 420111, Российская Федерация

<sup>2</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008, Российская Федерация

<sup>3</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, 125412, Российская Федерация

*Представлены результаты экспериментальных и численных исследований свойств электрического разряда, формируемого между металлическим катодом и жидким (неметаллическим) анодом при атмосферном давлении. Разряд зажигается путем погружения металлического катода (из алюминия марки АМЦ-40) в электролитический анод (3%-ный раствор NaCl в очищенной воде). Исследованы электрофизические параметры разряда, в том числе вольт-амперная характеристика, пульсации тока и напряжения разряда. Методом инфракрасной термографии определена температура поверхности электродов в зоне горения разряда. Представлены результаты численных расчетов эволюции электронной и ионной компонент с учетом происходящих между ними плазмохимических превращений. В качестве источников электронной компоненты рассматриваются процессы ионизации и отщипывания, а в качестве ее стоков — прилипание электронов к нейтралам и электрон-ионную рекомбинацию.*

**Ключевые слова:** плазменно-жидкостные системы, электрический разряд, жидкие электроды, численные методы, термография

**Введение.** Плазменно-жидкостные системы, в которых применяются неметаллические жидкости, например, растворы солей в технической, дистиллированной или очищенной водопроводной воде, обладают ценными свойствами. Электрические разряды, формируемые в таких системах, относятся к самостоятельным, они могут гореть в многоканальной или объемной (диффузной) форме при питании постоянным током. Как правило, диапазон давления атмосферного воздуха, при котором исследуется разряд, варьируется от  $10^5$  до  $10^3$  Па, так как при более низких значениях давления электролит начинает кипеть, в связи с чем поддержание разряда в стационарной форме затрудняется [1–3].

Электрические разряды с жидкими (неметаллическими) электродами представляют собой быстроразвивающуюся междисциплинарную область исследований, включающую в себя науку о плазме, тепломассопереносе, гидрогазодинамике, фотолизе и многофазной химии [4]. Такие системы содержат электроды, расположенные в различных конфигурациях, их можно разделить на четыре основные категории:

- разряд в жидкости при погружении металлического электрода в электролит [5];
- разряд в газовой фазе при расположении металлического электрода над электролитом [6];
- разряды между двумя жидкими (проточными и непроточными) электродами [1];
- разряды в многофазных средах, в том числе внутри пузырьков, парогазовой смеси, аэрозолях и пенах [7].

В такой конфигурации электродов, где только один электрод является жидкостью, свойства разряда в некоторой степени схожи с аномальным тлеющим и с дуговым разрядом. В том варианте, где оба электрода — жидкость, разряд горит при относительно высоком напряжении ( $U \geq 10^3$  В) и низкой плотности тока ( $j \sim 0,1 \dots 1,0$  А/см<sup>2</sup>). Изменение состава и концентрации электролита дает возможность управлять режимом горения в широких пределах. Длительность горения разряда, которая при металлических электродах обычно лимитируется их эрозией, для разряда с жидкими (неметаллическими) электродами практически не ограничена. Разряд может поддерживаться как постоянным током, так и ВЧ и СВЧ токами [8–12].

Разряды с жидким (неметаллическим) электродом часто используются для модификации материалов и изделий различной физической природы. Технология электролитно-плазменной обработки металлических изделий распространена в разных отраслях производства. Наличие в излучении разряда с жидким (неметаллическим) электродом спектральных линий элементов, растворенных в жидкости, а также сильная неравновесность генерируемой разрядом плазмы, в том числе при горении разряда в атмосфере газов высокого давления, делают его перспективным для различного технического применения в плазмохимии (в частности, для очистки загрязненных газовых потоков), спектроаналитике и других областях [13–15].

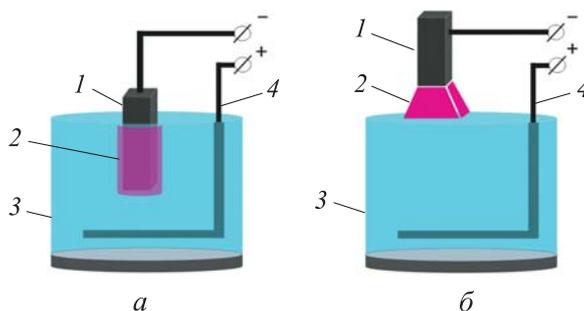
Несмотря на то, что разряд с жидкими (неметаллическими) электродами исследуется на протяжении длительного времени, до сих пор не создана единая классификация плазменно-жидкостных систем, которая уже имеется для разрядов с традиционными электродами (тлеющий, дуговой, искровой и др.). Известно, что разряды классифицируются по элементарным процессам. Поэтому остается актуальным проведение комплексных экспериментальных и теоретических исследований таких разрядов, результаты которых будут положены в основу базы знаний для формирования классифицирующих параметров в области плазменно-жидкостных систем.

В работе [16] 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, а также электрофизические параметры. Получены данные о составе плазмы разряда, концентрации электронов и тяжелой компоненте. Приведены результаты численных расчетов протекания тока в электролитической ячейке и представлены механизмы начальной стадии разряда.

Цель данной работы — исследование свойств разряда при изменении полярности электродов, т. е. при горении разряда между металлическим катодом и жидким (неметаллическим) анодом. Результаты работы могут быть использованы для разработки физико-математических моделей плазменно-жидкостных систем, а также для инженерных методов расчета плазменных установок.

**Экспериментальная установка.** Зажигание и исследование электрического разряда в рассматриваемой конфигурации электродов осуществлялись на установке (рис. 1). Металлическим катодом служил металлический стержень из алюминия марки АМЦ-40, а в качестве жидкого (неметаллического) анода был выбран 3%-ный раствор NaCl в очищенной водопроводной воде.



**Рис. 1.** Функциональная схема газоразрядной камеры для поддержания разряда при погруженном металлическом катоде в электролит (*а*) и при расположении металлического катода над поверхностью электролита (*б*):

1 — металлический катод; 2 — область с разрядом; 3 — электролитическая ванна; 4 — металлическая пластина из меди марки М1 для подвода положительного потенциала к электролиту

Металлический катод предварительно погружался в электролит и перемещался автоматическим манипулятором в вертикальной плоскости на расстояние 10 мм. Для контроля температуры раствора электролита в ванне был предусмотрен термостат. С помощью циркуляционного охладителя рефрижераторного типа осуществлялось термостатирование электролита, а его обновление в ванне обеспечивала система подачи и откачки электролита. Для очищения раствора от примесей в этой системе предусмотрен фильтр грубой очистки. Пары электролита удалялись из зоны исследования разряда с использованием стационарной вытяжки и вентилятора.

Экспериментальная установка оснащена высоковольтным генератором мощностью 40 кВт с изменяемым напряжением до 4 кВ при номинальном токе до 10 А, который обеспечивает питание тока разряда, а также диагностического и вспомогательного оборудования. Генератор питания оперирует преобразованием и регулированием сетевого напряжения. В его состав входят высоковольтный и низковольтный регулируемые блоки, обеспечивающие указанные диапазоны устанавливаемых напряжений и тока. Установка заземлена, текущие значения тока и напряжения, которые показывают стрелочные индикаторы на пульте источника, передаются на управляющий компьютер, и их контролирует оператор.

Эксперименты проводили при следующих устанавливаемых параметрах: напряжение  $U = 0,05 \dots 1,1$  кВ; давление  $p = 10^5$  Па; диаметр металлического катода  $d_k = 7$  мм; межэлектродное расстояние между металлическим катодом и электролитическим анодом  $i = 5$  мм; глубина погружения металлического электрода в электролит  $h = 3$  мм; удельная электропроводность электролита  $\sigma = 0,1 \dots 0,12$  Ом<sup>-1</sup> см<sup>-1</sup>; температура жидкого (неметаллического) анода  $T_a = 19 \dots 23$  °С.

Для решения поставленной задачи применялись современные диагностическое оборудование, методы и подходы исследований.

- Видеосъемка протекающих в зоне горения разряда процессов и образующихся при этом плазменных структур проводилась с помощью высокоскоростной видеокамеры Casio EX-F1. Вследствие высокой динамичности протекающих в зоне горения разряда процессов была выбрана скорость съемки 1200 и 600 кадр/с. Камера, установленная на штатив на расстоянии 300 мм от зоны горения разряда, передавала получаемую информацию на ЭВМ, обслуживаемую оператором. Полученные данные обрабатывались на персональном компьютере с установленным программным обеспечением NX Link и Movavi Video Editor 14 Plus.

- Для анализа распределения температуры исследуемой поверхности металлического и электролитического электродов в процессе горения разряда использовалась тепловизионная камера FLIRA6500SC с пространственным разрешением детектора 640×512 пикселей при рабочем спектральном диапазоне 3,6...4,9 мкм. Тепловизор обеспечивал фиксирование температуры поверхности электродов в калиброванном диапазоне 4...2400 °С. В связи с тем, что при горении разряда могут образовываться оксидная пленка и окалина, приводящие к погрешностям измеряемой температуры, для калибровки тепловизионной камеры использовался многоволновый пирометр. Полученные значения обрабатывались на ЭВМ с программным обеспечением ALTAIR v5.91.010.

- Исследование пульсаций, колебаний тока и напряжения разряда проводили с помощью цифровых осциллографов GDS-806S

и GOS-6030. Для обеспечения контроля электрофизических параметров в момент зажигания и поддержания разряда к осциллографам подключалось устройство для фиксации оптического излучения разряда на фотодиодах с микросхемой в момент горения разряда.

- Численные расчеты выполнялись в среде MATLAB. Система уравнений, состоящая из уравнений баланса для концентраций электронов, положительных и отрицательных ионов, а также уравнения Пуассона для потенциала электрического поля, решалась методом конечных элементов в двумерной постановке при наличии аксиальной симметрии.

**Обсуждение полученных результатов.** Разряд формируется посредством погружения металлического катода в электролит на глубину 3 мм при атмосферном давлении воздуха. При подаче на электроды потенциала до 290 В металлический катод начинает нагреваться протекающим в цепи постоянным током. Происходят эмиссия электронов с поверхности катода и их движение в направлении анода. При этом электролит вокруг металлического катода начинает кипеть и переходить в газообразное состояние, что сопровождается его интенсивным испарением и выделением конвективных парогазовых потоков. На границе раздела электрод—электролит протекает процесс, характерный для электролиза.

С повышением прикладываемого напряжения более 300 В фиксируется пробой с горением разряда в виде микроканалов, которые периодически появляются в парогазовой оболочке вокруг металлического катода. Горение разряда с сформированными импульсами тока  $I = 2,5 \dots 11$  А сопровождается сильными акустическими хлопками и возмущениями поверхности электролита с его обильным испарением, вызванным периодическим контактом жидкости с поверхностью сильно нагретого металлического электрода.

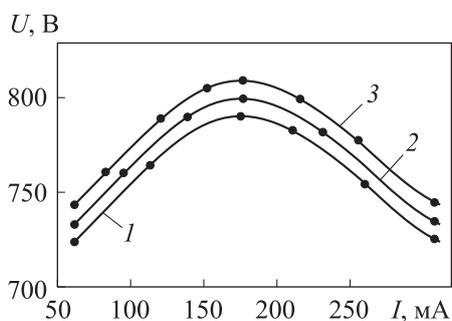
Затем автоматический манипулятор поднимает металлический катод на 5 мм над поверхностью жидкого анода. В результате этого разряд стабилизируется в объемной (диффузной) форме желтого цвета, который обусловлен наличием элемента Na в растворе электролита.

Анализ результатов термографии показал, что температура металлического катода в промежутке от 9 до 208 px (пикселей) повышается и достигает  $T_k = 445$  °С. Далее в интервале от 209 до 310 px  $T_k$  не меняется (рис. 2), так как напряженность электрического поля у поверхности металлического катода вблизи разряда имеет максимальное значение. Затем в промежутке от 311 до 365 px значение  $T_k$  падает до 100 °С, что и происходит в зоне с горячим газом вблизи металлического катода. В диапазоне 330...345 px также фиксируются скачки температуры до 200 °С, что соответствует анодным пятнам на поверхности жидкого (неметаллического) анода. Промежуток на графике, соответствующий интервалу 365–383 px, относится к жидкому аноду, температура которого меняется в диапазоне  $T_a = 89 \dots 99$  °С.



**Рис. 2.** Термограмма поверхности металлического катода и жидкого (неметаллического) анода в условиях горения разряда

Была построена вольт-амперная характеристика (ВАХ) разряда после расположения металлического катода над поверхностью жидкого анода (рис. 3). Из ее анализа следует, что в интервале тока 75...150 мА значение  $U$  повышается, а с возрастанием тока от 150 до 300 мА характеристика разряда падает.



**Рис. 3.** ВАХ разряда между металлическим катодом и жидким (неметаллическим) анодом при межэлектродном расстоянии  $i$ , равном 1 мм (1), 3 мм (2), 5 мм (3)

Такое развитие ВАХ разряда объясняется тем, что с увеличением тока изменяется характер процессов ухода электронов из разряда. Вместо диффузионных существенную роль начинают играть объемные процессы. При этом возрастание тока может быть вызвано только повышением напряженности электрического поля газового разряда.

С увеличением тока повышается температура газа, что приводит к его разрежению в приосевой области и, соответственно, к возрастанию локального значения приведенной напряженности  $E$  электрического поля  $E/N$  ( $N$  — концентрация частиц газа). В связи с этим частота ионизации газа резко увеличивается.

Характерное время жизни свободного электрона в разряде слабее зависит от температуры газа, чем от напряженности, поэтому для сохранения стационарной концентрации электронов в положительном столбе напряженность электрического поля газового разряда должна уменьшаться. Таким образом, разогрев газа в парогазовом промежутке между электродами приводит к падающей ВАХ.

Рассмотрим модель разряда между штыревым катодом и электролитическим анодом, а также уравнения баланса концентраций электронов и ионов с учетом происходящих между ними плазмохимических превращений. В качестве источников электронной компоненты приняты процессы ионизации и отлипания, а в качестве ее стоков — прилипание электронов к нейтралам и электрон-ионная рекомбинация. Такие процессы определяют эволюцию концентраций положительных и отрицательных ионов. Если принимать во внимание процессы диффузии и дрейфа заряженных частиц, то можно прийти к следующей системе дрейфово-диффузионных уравнений, описывающей эволюцию концентраций носителей заряда в разрядной области:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = (\alpha_i - \alpha_a) n_e + \alpha_d n_n - \beta_{ei} n_e n_p - \operatorname{div} \mathbf{J}_e + q; \quad (1)$$

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = \alpha_i n_e - \beta_{ep} n_e n_p - \beta_{np} n_n n_p - \operatorname{div} \mathbf{J}_p + q; \quad (2)$$

$$\frac{\partial n_n}{\partial t} = \alpha_d n_e - \alpha_d n_n - \beta_{np} n_n n_p - \operatorname{div} \mathbf{J}_n. \quad (3)$$

Здесь  $n_e$ ,  $n_p$ ,  $n_n$  — концентрации электронов, положительных и отрицательных ионов соответственно;  $\alpha_i$ ,  $\alpha_a$ ,  $\alpha_d$  — частоты ионизации, прилипания и отлипания электронов;  $\beta_{ei}$ ,  $\beta_{np}$  — коэффициенты электрон-ионной и ион-ионной рекомбинации;  $q$  — частота внешней ионизации.

Плотности потоков частиц задаются уравнениями

$$\mathbf{J}_s = n_s \mathbf{v}_s - D_s \operatorname{grad} n_s, \quad (4)$$

где индекс  $s$  принимает значения  $e$ ,  $p$  и  $n$ ;  $D_e$ ,  $D_p$ ,  $D_n$  — коэффициенты диффузии.

Дрейфовые скорости частиц

$$\mathbf{v}_e(\mathbf{r}, t) = -\mu_e \mathbf{E}(\mathbf{r}, t); \quad (5)$$

$$\mathbf{v}_n(\mathbf{r}, t) = -\mu_n \mathbf{E}(\mathbf{r}, t); \quad (6)$$

$$\mathbf{v}_p(\mathbf{r}, t) = \mu_p \mathbf{E}(\mathbf{r}, t). \quad (7)$$

Здесь  $\mu_e, \mu_p, \mu_n$  — подвижности электронов, положительных и отрицательных ионов соответственно;  $\mathbf{E}$  — напряженность электрического поля;  $\mathbf{r}$  — радиус-вектор рассматриваемой точки;  $t$  — время.

Для расчета распределения потенциала электрического поля используется уравнение Пуассона

$$\Delta\varphi = -\frac{e}{\varepsilon_0}(n_p - n_e - n_n). \quad (8)$$

Вектор напряженности электрического поля

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = -\text{grad}\varphi(\mathbf{r}, t). \quad (9)$$

Здесь  $\varphi$  — потенциал электрического поля.

Принято условие цилиндрической симметрии относительно оси  $z$ . Расчеты проводились для давления  $p = 100$  кПа при следующих граничных условиях:

на металлическом катоде

$$\varphi|_k = -V, \quad J_e|_k = \gamma J_p|_k, \quad \left. \frac{\partial n_e}{\partial \mathbf{n}} \right|_k = 0, \quad \left. \frac{\partial n_p}{\partial \mathbf{n}} \right|_k = 0, \quad n_n|_k = 0,$$

где  $\gamma$  — коэффициент вторичной эмиссии электронов;  $\mathbf{n}$  — вектор нормали к границе;

на границе плазмы с диэлектриком применяется условие непрерывности плотности тока;

на остальной границе

$$n_e = n_p = n_n = 0, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{n}} = 0.$$

Условие аксиальной симметрии ( $r$  — радиальная координата) представлено так:

$$\frac{\partial n_e}{\partial r} = \frac{\partial n_p}{\partial r} = \frac{\partial n_n}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial r} = 0 \text{ при } r = 0.$$

Электролит рассматривался как однородная проводящая среда с заданной электропроводностью  $\sigma$ .

Коэффициент ионизации  $\alpha_i = \mu_e E \alpha_T$  ( $T$  — температура). Зависимость коэффициента ионизации Таунсенда  $\alpha_T$  от  $E/p$  для воздуха принята в виде

$$\frac{\alpha_T}{p} = A \exp\left(-\frac{B}{E/p}\right),$$

где  $p$  — давление;  $A = 15 \text{ см}^{-1} \text{ Тор}^{-1}$ ,  $B = 365 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1} \text{ Тор}^{-1}$ .

Расчеты по уравнениям проводились до тех пор, пока не были получены стационарные значения концентраций заряженных частиц.

Изменение напряженности электрического поля вдоль оси разряда при приложенном напряжении на электрод  $U = 750 \text{ В}$  приведено на рис. 4. Расстояние между электродом и поверхностью электролита принималось равным 3 мм.

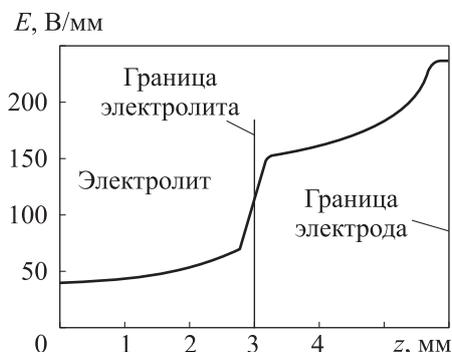


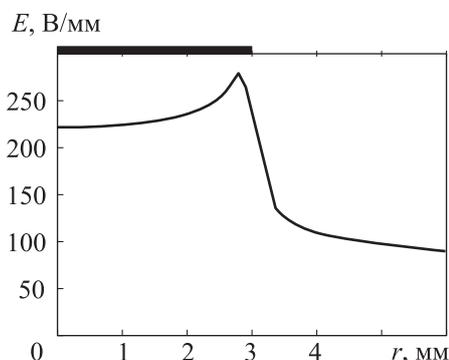
Рис. 4. Изменение напряженности электрического поля вдоль оси  $z$  разряда ( $r = 0$ )

Электрическое поле очень неоднородно вблизи электрода. Приведенное на графике расстояние от 0 до 3 мм соответствует электролиту, в котором напряженность электрического поля плавно изменяется от 40 до 60 В/мм, потому что он здесь является однородной проводящей средой.

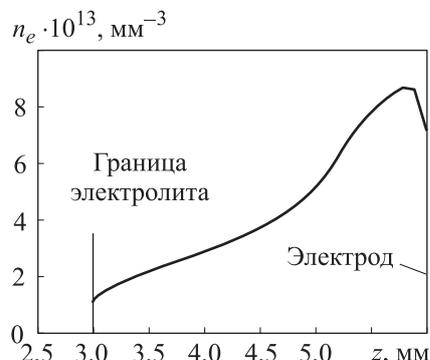
На границе между электролитом и разрядом в диапазоне 2,8...3,2 мм напряженность электрического поля резко возрастает, что объясняется разностью электропроводности электролита и плазмы в прилегающей к электролиту области. Диапазон 3,2...6 мм соответствует области газоразрядной плазмы, где напряженность электрического поля плавно повышается от 150 до 240 В/мм вследствие неоднородности такого поля, создаваемого штыревым катодом.

В прикатодной области на расстоянии от 5,8 до 6 мм напряженность электрического поля имеет практически постоянное значение, так как в малой прикатодной области вдоль центральной линии оно будет приблизительно однородным. Изменение напряженности вдоль нижней кромки электрода продемонстрировано на рис. 5, на котором

видно, что напряженность электрического поля возрастает у кромок металлического электрода до 275 В/мм за счет сильной неоднородности этого поля.



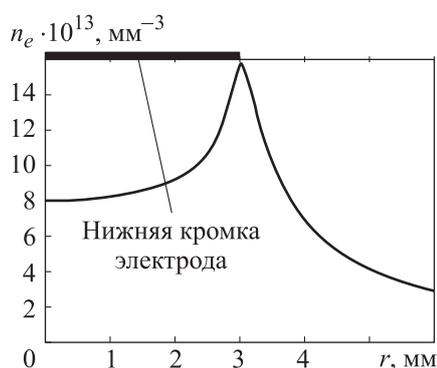
**Рис. 5.** Изменение напряженности электрического поля вдоль нижней кромки электрода



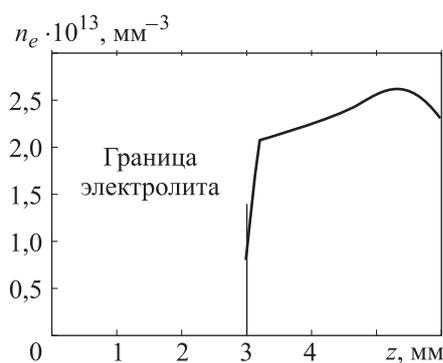
**Рис. 6.** Изменение концентрации электронов вдоль оси  $z$  разряда ( $r = 0$ )

Концентрация электронов меняется вдоль оси разряда от  $8 \cdot 10^{13} \text{ мм}^{-3}$  вблизи металлического катода до  $\sim 10^{13} \text{ мм}^{-3}$  вблизи электролитического анода (рис. 6). Непосредственно вблизи катода электроны образуются в результате бомбардировки поверхности ионами, а далее они ускоряются в электрическом поле и происходит ионизация парогазового промежутка. Это приводит к увеличению концентрации электронов, которая затем падает ввиду уменьшения напряженности электролитического поля в направлении к электролиту (см. рис. 4).

Концентрация электронов максимальна около кромки электрода, где наибольшая напряженность электрического поля, которая достигает  $16 \cdot 10^{13} \text{ мм}^{-3}$  (рис. 7).



**Рис. 7.** Изменение концентрации электронов вдоль нижней кромки электрода радиусом 3 мм



**Рис. 8.** Изменение концентрации положительных ионов вдоль оси  $z$  разряда

Распределение концентрации положительных ионов вдоль оси разряда приведено на рис. 8. Расчеты показали, что в основной области разряда практически выполняется условие квазинейтральности  $n_p - n_e - n_n \approx 0$ . Вблизи поверхности катода концентрация положительных ионов возрастает, потому что происходит ионизация парогазовой смеси электронным ударом. Далее концентрация положительных ионов убывает, так как снижается концентрация электронов в направлении электролита и сокращения процессов ионизации.

**Заключение.** Установлено горение при напряжении 300 В электрического разряда в виде микроканалов, которые периодически появляются и исчезают, в парогазовой смеси вокруг металлического катода. Горение имеет импульсный характер с колебаниями тока в диапазоне 2,5...11,0 А. При подъеме металлического катода над поверхностью жидкого (неметаллического) анода разряд стабилизируется в объемной (диффузной) форме желтого цвета, обусловленного наличием элемента Na в растворе электролита. Построена вольтамперная характеристика (ВАХ) разряда после расположения металлического катода над поверхностью жидкого анода. В диапазоне тока 75...150 мА величина  $U$  возрастает, а с увеличением тока от 150 до 300 мА ВАХ разряда имеет тенденцию к падению. Такое развитие ВАХ разряда объясняется тем, что с увеличением тока меняется процесс гибели электронов в положительном столбе плазмы. Вместо диффузионных существенную роль начинают играть объемные процессы. Установлено, что напряженность электрического поля возрастает у кромок металлического электрода до 275 В/мм за счет очень большой неоднородности электрического поля. Концентрация электронов меняется вдоль оси разряда от  $8 \cdot 10^{13} \text{ мм}^{-3}$  вблизи металлического катода до  $\sim 10^{13} \text{ мм}^{-3}$  вблизи электролитического анода. По сравнению с работой [17], где экспериментальным исследованием также определяется концентрация электронов, достигающая  $7,5 \cdot 10^{13} \text{ мм}^{-3}$ , разность составляет от  $0,5 \cdot 10^{13} \text{ мм}^{-3}$  до  $6,5 \cdot 10^{13} \text{ мм}^{-3}$ .

Приведено распределение концентрации положительных ионов вдоль оси разряда. Расчеты показали, что в основной области разряда  $n_p - n_e - n_n \approx 0$ , т. е. приблизительно выполняется условие квазинейтральности

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

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гайсин А.Ф., Кашапов Н.Ф. Исследование физических процессов в зоне газового разряда между жидкими электродами. *ПМТФ*, 2018, т. 59, № 4 (350), с. 19–22.

- [2] Gaisin A.I.F., Son E.E., Efimov A.V., Gil'mutdinov A.Kh., Kazhapov N.F. Spectral diagnostics of plasma discharge between a metal cathode and liquid anode. *High Temperature*, 2017, vol. 55, pp. 457–460.
- [3] Kashapov N., Kashapov R., Kashapov L. Influence of the electrolytic cathode temperature on the self-sustaining mechanism of plasma-electrolyte discharge. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2018, vol. 51, paper 494003.
- [4] Bruggeman P., Kushner M.J., Locke B.R. et al. Plasma–liquid interactions: a review and roadmap. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2016, vol. 25, paper 053002.
- [5] Акишев Ю.С., Грушин М.Е., Каральник В.Б., Монич А.Е., Панькин М.В., Трушкин Н.И., Холоденко В.П., Чугунов В.А., Жиркова Н.А., Ирхина И.А., Кобзев Е.Н. Создание неравновесной плазмы в гетерофазных средах газ-жидкость при атмосферном давлении и демонстрация ее возможностей для стерилизации. *Физика плазмы*, 2006, т. 32, № 12, с. 1142–1152.
- [6] Баринов Ю.А., Школьник С.М. Разряд с жидким неметаллическим катодом (водопроводная вода) в потоке воздуха атмосферного давления. *Журнал технической физики*, 2016, т. 86, № 11, с. 155–158.
- [7] Самитова Г.Т., Гайсин А.Ф., Мустафин Т.Б., Гайсин А.Ф., Сон Э.Е., Весельев Д.А., Гайсин Ф.М. Некоторые особенности многоканального разряда в трубке при атмосферном давлении. *Теплофизика высоких температур*, 2011, т. 49, № 5, с. 788–792.
- [8] Сироткин Н.А., Титов В.А. Экспериментальное исследование нагрева жидкого катода и переноса его компонентов в газовую фазу под действием разряда постоянного тока. *Прикладная физика*, 2016, № 6, с. 25–31.
- [9] Валиев Р.И., Хафизов А.А., Багаутдинова Л.Н., Гайсин Ф.М., Басыров Р.Ш., Гайсин Аз.Ф., Гайсин Ал.Ф., Желтухин В.С., Сон Э.Е. Электрические разряды переменного тока в газожидкостной среде раствора хлорида натрия при атмосферном давлении. *Теплофизика высоких температур*, 2021, т. 59, № 4, с. 634–637.
- [10] Гайсин Ал.Ф., Гайсин Ф.М., Желтухин В.С., Сон Э.Е. Высокочастотный разряд со струйным электролитическим электродом. *Физика плазмы*, 2022, т. 48, № 1, с. 71–78.
- [11] 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. 625–633.
- [12] Аверин К.А., Лебедев Ю.А., Шахатов В.А. Некоторые результаты исследования СВЧ-разряда в жидких тяжелых углеводородах. *Прикладная физика*, 2016, № 2, с. 41–45.
- [13] Гайсин А.Ф., Каюмов Р.Р., Купутдинова А.И., Марданов Р.Р. Плазменно-жидкостной рециклинг металлического порошка для 3D-печати. *Физика и химия обработки материалов*, 2023, № 1, с. 37–44.
- [14] Гайсин А.Ф., Гильмутдинов А.Х. Электролитно-плазменная обработка изделия, изготовленного с применением аддитивной технологии. *Физика и химия обработки материалов*, 2020, № 2, с. 28–34.
- [15] 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. 69–74.
- [16] Петряков С.Ю., Мирханов Д.Н., Гайсин А.Ф., Басыров Р.Ш., Кашапов Н.Ф. Разряд постоянного тока между металлическим анодом и жидким неметаллическим катодом. *ПМТФ*, 2022, т. 63, № 5 (375), с. 20–32.
- [17] Гайсин А.Ф., Гильмутдинов А.Х. Электролитно-плазменная обработка изделия, изготовленного с применением аддитивной технологии. *Физика и химия обработки материалов*, 2020, № 2, с. 28–34.

Статья поступила в редакцию 23.12.2024

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Бельгибаев Э.Р., Хафизов А.А., Каюмов Р.Р., Гайсин А.Ф. Электрофизические и тепловые свойства разряда с жидким (неметаллическим) анодом. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2025, вып. 4. EDN NTANTU

**Бельгибаев Эдуард Рустемович** — ассистент кафедры технической физики Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ. Область научных интересов – физика газового разряда. e-mail: ERBelgibaev@kai.ru

**Хафизов Алмаз Анзяпович** — старший преподаватель Набережночелнинского института (филиала) Казанского (Приволжского) федерального университета. Область научных интересов — физика газового разряда. e-mail: AANafizov@kpfu.ru

**Каюмов Рушан Рашитович** — канд. техн. наук, доцент; доцент кафедры технической физики Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева — КАИ. Область научных интересов — физика газового разряда. e-mail: rushan\_250189033@mail.ru

**Гайсин Алмаз Фивзатович** — д-р техн. наук, доцент по специальности «Физика плазмы»; научный сотрудник Объединенного института высоких температур РАН. Область научных интересов — физика газового разряда. e-mail: almaz87@mail.ru

## Electrophysical and thermal properties of a discharge with the liquid (non-metallic) anode

© E.R. Belgibaev<sup>1</sup>, A.A. Khafizov<sup>2</sup>, R.R. Kayumov<sup>1</sup>, A.F. Gaisin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, 420111, Russian Federation

<sup>2</sup>Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, 420008, Russian Federation

<sup>3</sup>Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412, Russian Federation

*The paper presents results of the experimental and numerical studying the electric discharge properties formed between a metal cathode and the liquid (non-metallic) anode at the atmospheric pressure. The discharge is ignited by immersing the metal cathode (AMC-40 aluminum) into the electrolytic anode (3% NaCl in the purified water). The paper analyzes the discharge electrophysical parameters, including the volt-ampere characteristic, current pulsations, and the discharge voltage. The electrode surface temperature in the discharge combustion zone is studied using the infrared thermography. The paper presents results of the numerical computation of the electron and ion components evolution, taking into account the plasma-chemical transformations between them. It considers the ionization and detachment processes as the sources of an electron component, and the electron attachment to neutrals and electron-ion recombination as its sinks.*

**Keywords:** plasma-liquid systems, electric discharge, liquid electrodes, numerical methods, thermography

*The study was supported by a Grant from the Russian Science Foundation (Project No. 21-79-30062)*

### REFERENCES

- [1] Gaisin A.F., Kashapov N.F. Issledovanie fizicheskikh protsessov v zone gazovogo razryada mezhdu zhidkimi elektrodami [Study of physical processes in the gas discharge zone between liquid electrodes]. *PMTF — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2018, vol. 59, no. 4 (350), pp. 19–22.
- [2] Gaisin A.F., Son E.E., Efimov A.V., Gilmutdinov A.Kh., Kazhapov N.F. Spectral diagnostics of plasma discharge between a metal cathode and liquid anode. *High Temperature*, 2017, vol. 55, pp. 457–460.
- [3] Kashapov N., Kashapov R., Kashapov L. Influence of the electrolytic cathode temperature on the self-sustaining mechanism of plasma-electrolyte discharge. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2018, vol. 51, p. 494003.
- [4] Bruggeman P., Kushner M.J., Locke B.R. et al. Plasma–liquid interactions: a review and roadmap. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2016, vol. 25, p. 053002.
- [5] Akishev Yu.S., Grushin M.E., Karalnik V.B., Monich A.E., Pankin M.V., Trushkin N.I., Kholodnenko V.P., Chugunov V.A., Zhirkova N.A., Irkhina I.A., Kobzev E.N. Sozdanie neravnovesnoy plazmy v geterofaznykh sredakh gaz–zhidkost pri atmosfernom davlenii i demonstratsiya ee dlya sterilizatsii [Creation of nonequilibrium plasma in the heterophase gas–liquid media at the atmospheric pressure and demonstration of its sterilization capabilities]. *Fizika plazmy — Plasma Physics Reports*, 2006, vol. 32, no. 12, pp. 1142–1152.
- [6] Barinov Yu.A., Shkolnik S.M. Razryad s zhidkim nemetallicheskim katodom (vodoprovodnaya voda) v potoke vozdukha atmosferного davleniya [Discharge with a liquid non-metallic cathode (tap water) in an atmospheric pressure air

- flow]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki — Technical Physics*, 2016, vol. 86, no. 11, pp. 155–158.
- [7] Samitova G.T., Gaisin A.F., Mustafin T.B., Gaisin A.F., Son E.E., Veselyev D.A., Gaisin F.M. Nekotorye osobennosti mnogokanalnogo razryada v trubke pri atmosfernom davlenii [Certain features of multichannel discharge in a tube under atmospheric pressure]. *Teplofizika vysokikh temperatur — High Temperature*, 2011, vol. 49, no. 5, pp. 788–792.
- [8] Sirotkin N.A., Titov V.A. Experimental study of heating of liquid cathode and transfer of its components into gas phase under action of direct current discharge. *Applied Physics*, 2016, no. 6, pp. 25–31.
- [9] Valiev R.I., Khafizov A.A., Bagautdinova L.N., Gaisin F.M., Basyrov R.Sh., Gaisin Az.F., Gaisin Al.F., Zheltukhin V.S., Son E.E. Elektricheskie razryady peremennogo toka v gazozhidkostnoy srede rastvora khlorida natriya v atmosfernom davlenii [Electrical discharges of alternating current in the gas-liquid medium of sodium chloride solution at the atmospheric pressure]. *Teplofizika vysokikh temperatur — High Temperature*, 2021, vol. 59, no. 4, pp. 634–637.
- [10] Gaisin Al.F., Gaisin F.M., Zheltukhin V.S., Son E.E. Vysokochastotnyi razryad so struynym elektroliticheskim elektrodom [High-frequency discharge with a jet electrolytic electrode]. *Fizika Plazmy — Plasma Physics Reports*, 2022, vol. 48, no. 1, pp. 71–78.
- [11] Gaisin Al.F., Son E.E., Petryakov S.Yu. Vysokochastotnyi emkostnoy razryad s protochnymi zhidkimi elektrodami pri ponizhenii davleniya [High-frequency capacitive discharge with the flowing liquid electrodes at the decreasing pressure]. *Fizika plazmy — Plasma Physics Reports*, 2017, vol. 43, no. 7, pp. 625–633.
- [12] Averin K.A., Lebedev Yu.A., Shakhmatov V.A. Nekotorye rezultaty issledovaniya SVCh-razryadov v zhidkikh tyazhelykh uglevododorodakh [Some results of study of a microwave discharge in liquid heavy hydrocarbons]. *Prikladnaya fizika — Applied Physics*, 2016, no. 2, pp. 41–45.
- [13] Gaisin A.F., Kayumov R.R., Kuputdinova A.I., Mardanov R.R. Plazmenno-zhidkostnoy retsikling metallichesкого poroshka dlya 3D-pechati [Plasma-liquid recycling of metal powder for 3D printing]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov — Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 2023, no. 1, pp. 37–44.
- [14] Gaisin A.F., Gilmutdinov A.Kh. Elektrolitno-plazmennaya obrabotka izdeliya, izgotovlennogo s primeneniem additivnoy tekhnologii [Electrolytic-plasma treatment of items produced with the use of additive technology]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov — Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 2020, no. 2, pp. 28–34.
- [15] Gaisin A.F., Gilmutdinov A.Kh., Mirkhanov D.N. Elektrolitno-plazmennaya obrabotka poverkhnosti detail, izgotovlennoy s primeneniem additivnoy tekhnologii [Electrolytic-plasma treatment of the surface of a part produced with the use of additive technology]. *Metalovedenie i termicheskaya obrabotka metallov — Metal science and heat treatment of metals*, 2018, no. 2 (752), pp. 69–74.
- [16] Petryakov S.Yu., Mirkhanov D.N., Gaisin A.F., Basyrov R.Sh., Kashapov N.F. Razryad postoyannogo toka mezhdru metallicheskim anodom i zhidkim nemetallicheskim katodom [Direct current discharge between a metal anode and the liquid non-metallic cathode]. *PMTF — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2022, vol. 63, no. 5 (375), pp. 20–32.
- [17] Gaisin Al.F., Gilmutdinov A.Kh. Elektrolitno-plazmennaya obrabotka izdeliya, izgotovlennogo s primeneniem additivnoi tekhnologii [Electrolytic-plasma

treatment of items produced with the use of additive technology]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov — Physics and chemistry of materials treatment*, 2020, no. 2, pp. 28–34.

**Belgibaev E.R.**, Assistant, Department of Technical Physics, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. Research interests: gas discharge physics. e-mail: ERBelgibaev@kai.ru

**Khafizov A.A.**, Senior Lecturer, Naberezhnye Chelny Institute (Branch), Kazan (Volga Region) Federal University. Research interests: gas discharge physics. e-mail: AAHafizov@kpfu.ru

**Kayumov R.R.**, Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technical Physics, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. Research interests: gas discharge physics. e-mail: rushan\_250189033@mail.ru

**Gaisin A.F.**, Dr. Sc. (Eng.), Associate Professor in Plasma Physics; Researcher, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences. Research interests: gas discharge physics. e-mail: almaz87@mail.ru