

## Высокочастотный разряд между металлическим и жидким (неметаллическим) электродами

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

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ,  
420111 Казань, Россия  
e-mail: almaz87@mail.ru

Поступило в Редакцию 7 декабря 2022 г.

В окончательной редакции 19 января 2023 г.

Принято к публикации 22 января 2023 г.

Проведено исследование характеристик низкотемпературной плазмы высокочастотного (ВЧ) разряда ( $f = 13.56$  МГц), зажигаемого между металлическим и электролитическим электродами при атмосферном давлении. Наблюдается горение ВЧ разряда в диффузной (объемной) форме на границе раздела сред между электродами. Представлены численные расчеты напряженности электрического поля и распределения объемной плотности мощности джоулевого тепловыделения до пробоя в парогазовой смеси вблизи металлического электрода. Методом оптической эмиссионной спектроскопии исследованы спектр излучения разряда, состав плазмы и концентрация электронов. Рассмотрены термограммы поверхности электродов в условиях горения ВЧ разряда.

**Ключевые слова:** электроды, газоразрядная камера, оптическая эмиссионная спектроскопия.

DOI: 10.21883/JTF.2023.03.54846.267-22

### Введение

Низкотемпературная плазма разрядов с жидкими (неметаллическими) электродами представляет собой быстроразвивающуюся междисциплинарную область исследований, включающую в себя науку о плазме, тепломассопереносе, гидрогазодинамике, фотолизе и многофазной химии [1]. Разряды в плазменно-жидкостных системах генерируются постоянным или переменным током в межэлектродном пространстве, где в качестве одного из электродов применяется жидкость. В качестве жидкого электрода, как правило, используются растворы солей различных концентраций в дистиллированной, технической или очищенной водопроводной воде. Зажигание разряда осуществляется в газоразрядных камерах с различными типами и формами конфигурации электродов, включающие в себя системы: твердый–жидкий электроды [2–5], жидкий (проточный)–жидкий (непроточный) электроды [6], жидкий (проточный)–жидкий (проточный) электроды [7]. Наиболее распространенные схемы зажигания разряда осуществляются при погружении металлического электрода в электролит [8], либо при расположении металлического электрода на некотором расстоянии от поверхности электролита [9]. Давление окружающего воздуха, используемое при проведении исследований, ограничивается диапазоном  $10^5$ – $10^3$  Па, так как при более низких давлениях начинается кипение раствора в электролитических ячейках газоразрядной камеры.

Разряды с жидкими (неметаллическими) электродами представляют большой интерес для решения различных

прикладных задач в области машиностроения, металлообработки и медицины. Специалисты из различных научных школ исследуют применения разрядов с жидкими электродами для обработки изделий со сложной геометрией внешней и внутренней поверхности, изготовленных как с применением традиционных методов производства (штамповка, литье и др.) [10–12], так и с применением аддитивных методов лазерного спекания металлических порошков [13]. В зарубежной и отечественной печати представлены результаты использования плазменно-жидкостных систем для производства мелкодисперсных порошков металлов и получения наночастиц, нанесения функциональных покрытий на изделия, анализа содержания частиц в жидкости, плазмохимических ректоров, стерилизации и очистки твердых тел, воды и воздуха [14]. Широкое разнообразие применений данных систем обусловлено большим количеством конфигураций газоразрядных камер, режимов и параметров зажигания и горения разряда, а также единичными плазмохимическими процессами, связанных с переносом вещества и заряда на границе раздела фаз.

Анализ опубликованных работ показывает, что наиболее исследованными в области плазменно-жидкостных систем являются разряды постоянного тока, некоторые из которых сформированы в виде технологий и внедрены на предприятиях машиностроения и металлообработки, где они успешно применяются для обработки поверхности металлических изделий с целью улучшения их эксплуатационных свойств.

В то же время количество „белых пятен“ в данной области науки все еще велико. Например, до сих пор

мало исследованными остаются ВЧ разряды с жидкими (неметаллическими) электродами, тогда как научные основы ВЧ разрядов между твердыми электродами подробно изложены в известных работах Ю.П. Райзера, М.Н. Шнейдера, Н.А. Яценко и др. [15].

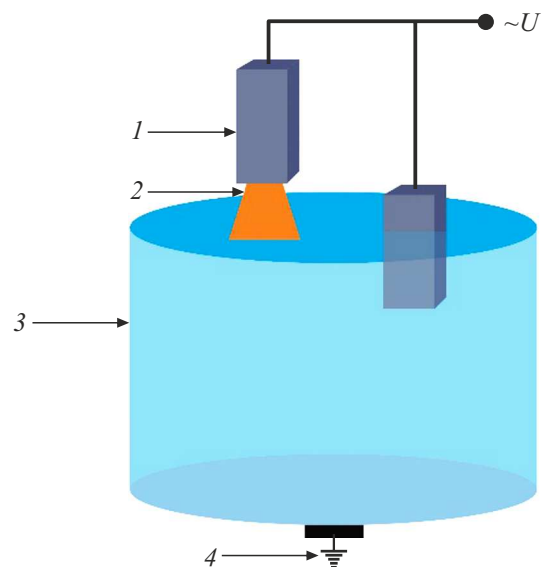
В разрядах с жидкими (неметаллическими) электродами сложным образом переплетены три подсистемы, описывающие соответственно физику процессов в плазменном (ВЧ разряд), жидком (непроточный и проточный электролит) и газовом (окружающий воздух) фазовых состояниях. В этих системах насчитывается более 50 заряженных, нейтральных атомных и молекулярных частиц, которые вступают в более 600 реакций друг с другом и влияют на баланс энергии в разряде [16]. Этим обусловлена сложность проведения численных работ. Полученные при этом результаты плохо коррелируются с экспериментальными данными. Все это затрудняет создание единой классификации плазменно-жидкостных систем, аналогично той, которая существует для разрядов с твердыми электродами (искровой, дуговой, тлеющий, коронный и др.) [17].

Одним из возможных направлений систематизации разрядов с жидкими электродами является их классификация по элементарным процессам, поэтому проведение поисковых работ и численных расчетов, которые качественно и количественно согласуются с экспериментальными данными, являются актуальной задачей. Авторами ранее были опубликованы результаты исследований ВЧ разрядов в системах, где оба электрода являются жидкостью, в том числе со струйными электродами [18,19]. Были исследованы электрофизические, тепловые и спектральные параметры разряда. На базе проведенных экспериментальных исследований были проведены численные расчеты, в результате которых был описан физический механизм возникновения кольцевых и полукольцевых плазменных структур вокруг струи электролита в ВЧ разряде. Показано, что напряженность электрического поля в области распада струйного течения может достигать значений  $10^9 - 10^{10}$  В/м, при которых возможна автоэлектронная эмиссия, ведущая к появлению в окрестности струи первичных электронов, что приводит к ионизации и возбуждению молекул окружающей газовой среды.

Целью настоящей работы является исследование свойств ВЧ разряда при погружении металлического электрода в электролит при атмосферном давлении. Для интерпретации условий пробоя в парогазовой смеси вблизи металлического электрода проведены численные расчеты напряженности электрического поля и распределение объемной плотности мощности джоулевого тепловыделения. Полученные результаты могут быть использованы для разработки математических моделей плазменно-жидкостных систем ВЧ разряда в рассматриваемой конфигурации электродов, а также при создании плазменных устройств.

## 1. Экспериментальная установка

Зажигание и исследование ВЧ разряда проводилось на экспериментальной установке с газоразрядной камерой (рис. 1) при устанавливаемых параметрах напряжения  $U = 0.1 - 4$  кВ, давления  $p = 10^5$  Па, диаметра металлического стержня  $d_T = 4 - 7$  мм, глубины погружения металлического стержня в электролит  $h = 0 - 3$  мм, межэлектродного промежутка  $i = 1 - 5$  мм (расстояние между металлическим электродом и электролитом при его подъеме над поверхностью раствора). Экспериментальная установка оснащена ВЧ генератором марки „ВЧГ8-60/13“ с рабочей частотой 13.56 МГц и колебательной мощностью 60 кВт. Генератор предназначен для нагрева диэлектрических материалов и питания технологических устройств. В качестве металлического электрода применялся металлический стержень, изготовленный методом селективного лазерного спекания из мелкодисперсного порошка марки „StainlessSteel PH1“ на 3D-принтере Electro Optical Systems (EOS). Примерный химический состав порошка: железо — 75%, хром — 15%, никель — 4.5%, медь — 3.5%). Электролит представлял собой 3%-й раствор NaCl в очищенной водопроводной воде. Металлический стержень, который являлся нагруженным электродом, погружался в заземленную ячейку с электролитом и перемещался в вертикальной плоскости на расстояние 8 мм с помощью автоматического манипулятора. Для контроля температуры раствора электролита в ванне предусмотрен термостат. Термостатирование электролита осуществлялось с помощью циркуляционного охладителя рефрижераторного типа. Обновление электролита в ванне осуществлялось с



**Рис. 1.** Функциональная схема рабочей камеры для поддержания ВЧ разряда между металлическим и жидким (неметаллическим) электродами: 1 — нагруженный электрод, 2 — ВЧ разряд, 3 — ванна с электролитом, 4 — заземление к корпусу установки.

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.

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

1. Видеосъемка динамики процессов, протекающих в зоне горения ВЧ 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 fps. Камера устанавливалась на штатив на расстояние 300 mm от зоны горения разряда, которая 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 ВЧ разряда анализировалось методом эмиссионной спектроскопии на оптико-волоконном спектрометре марки „PLASUS EC 150201 MC“. Регистрация излучения разряда осуществлялась с помощью коллиматора для фиксации световых лучей в диапазоне длин волн 195–1105 nm. Коллиматор подводился к зоне горения разряда на расстояние 100–200 mm. 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  $\Delta\lambda_g = 1$  nm. Исследуемое излучение собиралось со всего объема формируемого разряда, поэтому оценка состава и компонентов плазмы выполнена без привязки к определенной точке на разряде. Анализ полученных данных осуществлялся при помощи сопоставления исследуемого спектра с базой данных национального института стандартов и технологий (NIST, США).

3. Для анализа распределения температуры исследуемой поверхности металлического и электролитического электродов в процессе горения ВЧ разряда использовалась тепловизионная камера марки „FLIRA6500SC“ с пространственным разрешением детектора  $640 \times 512$  пикселей при рабочем спектральном диапазоне 3.6–4.9  $\mu\text{m}$ . Тепловизор обеспечивал фиксацию температуры поверхности электродов в калиброванном диапазоне от 4–2400°C. Обработка полученных значений проводилась на ЭВМ с программным обеспечением „ALTAIR v5.91.010“.

4. Исследования колебаний тока и напряжения разряда ВЧ тока производились цифровым осциллографом

марки „АКТАКОМ АСК-2067“ с делителем напряжения высокой частоты марки „Электроника Р6015А“.

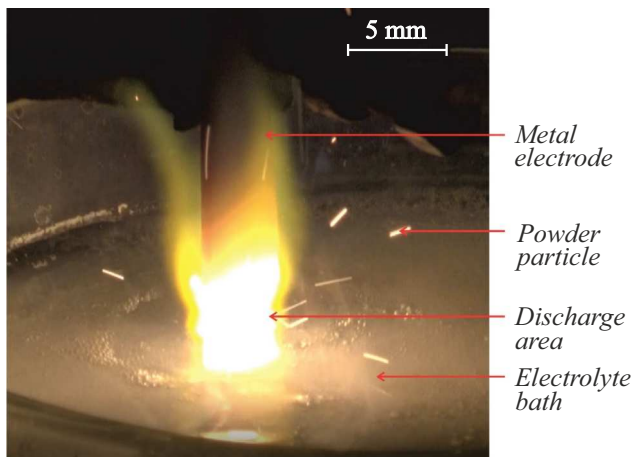
5. Численные расчеты осуществлялись в среде „MATLAB“. Рассматривалось протекание ВЧ тока в электролитической ячейке с заземленным проводящим днищем. Задача решалась с помощью метода конечных элементов, расчетная область разбивалась на элементы в виде тетраэдров. Модель включает в себя уравнения Максвелла для напряженностей электрического и магнитного полей, вектора плотности тока и потенциала электрического поля.

## 2. Обсуждение результатов

Зажигание ВЧ разряда контактным методом с помощью металлического электрода диаметром 4 mm с поверхностью электролита показало, что при установке напряжения до 1 kV в области взаимодействия электродов инициализируется процесс испарения, а затем кипения электролита с интенсивным парообразованием, который происходит как на свободной поверхности жидкости, так и вокруг металлического электрода. При этом вокруг металлического электрода возникает граница разделения фаз, т.е. на его поверхности образуются пузырьки, которые содержат воздух и насыщенный пар. ВЧ ток в цепи приводит в действие процессы химического выделения растворенных веществ из электролита и джоулевого тепловыделения с поверхности металлического электрода. 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 ВЧ разряд мощность недостаточна для ионизации паровоздушной смеси и возникновения электронной лавины.

В диапазоне напряжений от 1 до 3 kV напряженность электрического поля достигает значений, достаточных для инициирования электронной лавины при пробое парогазового промежутка. После пробоя парогазового промежутка на образование свободных электронов в ВЧ разряде могут влиять ионизация прямым электронным ударом, ступенчатая, фото- и диссоциативная ионизация в объеме, а также плазмохимические реакции между продуктами диссоциации на границе электролита и в объеме. После пробоя металлический электрод из погруженного состояния с помощью гидропривода поднимался над поверхностью электролита. Из анализа высокоскоростной съемки установлено, что ВЧ разряд формируется в виде микроканалов, которые пульсируют в паровоздушной смеси вокруг металлического электрода. При увеличении напряжения более 3.5 kV ВЧ разряд переходит в объемный (диффузный) режим горения (рис. 2).

Анализ осциллограмм показал, что колебания тока и напряжения ВЧ разряда имеют несинусоидальный и



**Рис. 2.** Фотография горения ВЧ разряда между металлическим и жидким (неметаллическим) электродами.

несимметричный вид. Наряду с этим на основной гармонике колебаний ( $f = 13.56 \text{ MHz}$ ) наблюдаются ВЧ пульсации. Размах колебаний тока ВЧ разряда варьируется 10 до 18 А. Горение объемного (диффузного) ВЧ разряда сопровождается интенсивным выделением конвективных паровоздушных потоков, образованием капель, акустическими хлопками и распылением металлического электрода над поверхностью жидкости с осаждением мелкодисперсного металлического порошка на дне электролитической ячейки. Изменение динамики протекающих на границе раздела сред процессов объясняется увеличением вкладываемой в ВЧ разряд мощности. Вследствие постепенного разрушения поверхности металлического электрода разрядом межэлектродное расстояние увеличивается и разряд гаснет. Для поддержания оптимального межэлектродного расстояния с целью стабилизации ВЧ разряда применялся автоматический манипулятор.

Для интерпретации условий пробоя в парогазовой смеси вблизи металлического электрода проведены численные расчеты напряженности электрического поля и распределения объемной плотности мощности джоулевого тепловыделения. Рассматривается протекание ВЧ тока в электролитической ячейке с заземленным проводящим днищем (рис. 1). Металлический цилиндрический электрод частично погружен в электролит и на него подается напряжение от источника ВЧ напряжения частотой  $f = 13.56 \text{ MHz}$ . Электролит — 3% раствор NaCl в технической воде.

Для расчета использовалась система уравнений Максвелла в отсутствие свободных зарядов

$$\text{rot} \mathbf{E} = -\mu_0 \mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\text{rot} \mathbf{H} = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mathbf{j}, \quad (2)$$

где вектор плотности тока проводимости

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}. \quad (3)$$

Применив оператор ротора к обеим частям уравнения (1) и используя (2), исключим напряженность магнитного поля

$$\text{rot rot} \mathbf{E} = -\varepsilon_0 \varepsilon \mu_0 \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \mu_0 \mu \frac{\partial \mathbf{j}}{\partial t}. \quad (4)$$

Имеет место тождество

$$\text{rot rot} \mathbf{E} = \text{grad div} \mathbf{E} - \Delta \mathbf{E}.$$

В случае отсутствия пространственных зарядов

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

тогда

$$-\Delta \mathbf{E} + \varepsilon_0 \varepsilon \mu_0 \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} + \mu_0 \mu \sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = 0. \quad (5)$$

Гармонически меняющееся поле можно представить в комплексном виде

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_c e^{j\omega t}, \quad (6)$$

где  $\mathbf{E}_c$  — комплексная амплитуда,  $\omega = 2\pi f$  — циклическая частота,  $j$  — мнимая единица.

Подставив (6) в (5), получим уравнение для комплексной амплитуды напряженности электрического поля

$$-\Delta \mathbf{E}_c + \varepsilon_0 \mu_0 \mu \omega^2 \left( j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} - \varepsilon \right) \mathbf{E}_c = 0. \quad (7)$$

Относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  и удельная электропроводность  $\sigma$  электролита зависят от температуры, концентрации раствора и частоты электромагнитного поля.

Приведены эмпирические модели расчета этих параметров для раствора NaCl (модель M22, [20]). Рассчитанное по данной модели значение статической диэлектрической проницаемости для раствора 3% раствора NaCl (соленость  $S = 30\%$ ) равно  $\varepsilon_S = 78$ , ионная проводимость  $\sigma = 4.87 \text{ S/m}$ .

В выражении (7) множитель  $\sigma/(\omega \varepsilon_0)$  характеризует рассеяние, вызванное током проводимости, а  $\varepsilon$  — рассеяние, вызванное током смещения. Переходная частота электромагнитной волны  $f_t$  определяется как частота, при которой ток проводимости равен току смещения:  $\sigma/(2\pi f_t \varepsilon_0) = \varepsilon$ , отсюда  $f_t = \sigma/(2\pi \varepsilon_0 \varepsilon)$ . Ток проводимости больше тока смещения при частотах  $f < f_t$  и меньше тока смещения при частотах  $f > f_t$ . Рассчитанное по статическим значениям проводимости и диэлектрической проницаемости для раствора NaCl значение переходной частоты равно  $f_t \approx 2.5 \text{ GHz}$ .

В рассматриваемом случае частоты ВЧ поля  $f = 13.56 \text{ MHz}$  имеем  $f \ll f_t$ , поэтому при расчетах можно применить статические значения для  $\varepsilon$  и  $\sigma$ .

Предполагая наличие осевой симметрии вокруг оси электрода, задачу будем рассматривать в цилиндрических координатах  $(r, z)$  (рис. 3). Пусть амплитуда приложенного к электроду ВЧ напряжения равна  $U_m$ .

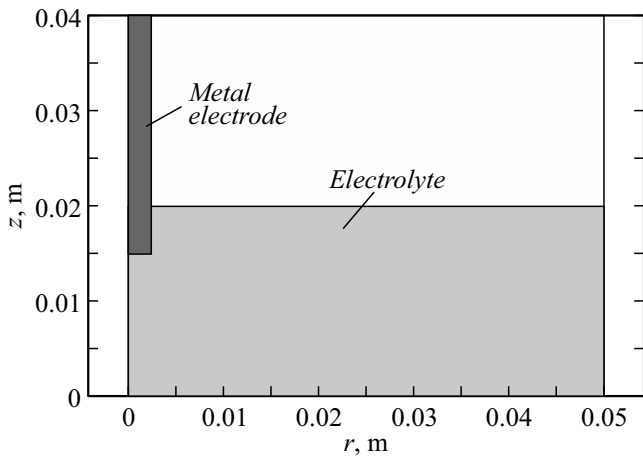


Рис. 3. Геометрия расчетной области:  $z$  — вертикальная координата,  $r$  — радиальная координата.

Пользуясь однородностью уравнения (7) вместо вектора  $\mathbf{E}_c$  задачу можно решить относительно величины  $\tilde{\mathbf{E}}_c = \mathbf{E}_c/U_m$  — приведенной напряженности (измеряется в 1/м).

Уравнения для радиальной  $\tilde{E}_r$  и вертикальной  $\tilde{E}_z$  компонент напряженности электрического поля в цилиндрической системе координат имеют вид

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \tilde{E}_r}{\partial r} \right) - \frac{\partial^2 \tilde{E}_r}{\partial z^2} + \frac{\tilde{E}_r}{r^2} + \mu \frac{\omega^2}{c^2} \left( j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} - \varepsilon \right) \tilde{E}_r = 0, \quad (8)$$

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \tilde{E}_z}{\partial r} \right) - \frac{\partial^2 \tilde{E}_z}{\partial z^2} + \mu \frac{\omega^2}{c^2} \left( j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} - \varepsilon \right) \tilde{E}_z = 0. \quad (9)$$

Здесь учтено соотношение  $\varepsilon_0 \mu_0 = 1/c^2$ .

Для решения уравнений (8), (9) необходимо задать граничные условия. На проводящих поверхностях касательная составляющая вектора напряженности обращается в 0:  $\tilde{E}_r(r, 0) = 0$  на нижней заземленной пластине;  $\tilde{E}_z(R, 0) = 0$  на поверхности электрода,  $R$  — радиус электрода ( $R = 0.0025$  м); на оси симметрии  $\tilde{E}_r(0, z) = 0$ .

Для задания нормальных составляющих вектора напряженности на проводящих поверхностях можно воспользоваться тем, что при частотах  $f \ll f_t$  поле можно считать медленно меняющимся и решать уравнение для скалярного потенциала электрического поля

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \mathbf{j} &= \operatorname{div} \sigma \mathbf{E} = 0, \\ \mathbf{E} &= -\operatorname{grad} \varphi, \\ \operatorname{div}(\sigma \operatorname{grad} \varphi) &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Для уравнения (10) задается значение потенциала на электроде  $\varphi = U_m$ , на заземленной пластине  $\varphi = 0$ .

Уравнение (10), а затем уравнения (8), (9) решались в среде МАТЛАБ решателем уравнений в частных производных pde4tool.

На рис. 4, а приведены линии постоянного значения модуля напряженности  $\tilde{E} = \sqrt{\tilde{E}_r^2 + \tilde{E}_z^2}$ . На рис. 4, б показана зависимость модуля напряженности от  $z$  в промежутке между электродом и нижней пластины при  $U_m = 1000$  В. Из графика видно, что вблизи металлического электрода  $E$  достигает значений 210 В/мм. Это обусловлено сильной неоднородностью электрического поля вблизи штыревого металлического электрода. В направлении нулевого потенциала  $E$  нелинейно падает.

Распределение объемной плотности мощности джоулевого тепловыделения  $\tilde{w} = \sigma \tilde{E}^2$  вблизи электрода приведено на рис. 5, а. Наибольшее тепловыделение происходит около кромки электрода, где электрическое поле сильно неоднородно. Исходя из рассчитанных значений напряженности электрического поля на кромке штыревого электрода возникает максимальное джоулево тепловыделение, достигающее значений 11 000 В/мм<sup>3</sup>, в дальнейшем в этой области происходит процесс образования парогазовой смеси с дальнейшим пробоем (рис. 5, б). В направлении электролита плотность мощности джоулевого тепловыделения быстро падает, что обусловлено уменьшением напряженности электрического поля.

Оценим характерное время парообразования  $\tau$  за счет джоулевого тепловыделения (4). Если пренебречь процессами теплоемкости и теплопроводности вся выделяемая мощность идет на парообразование:

$$\sigma E^2 \Delta V \tau = r \rho \Delta V.$$

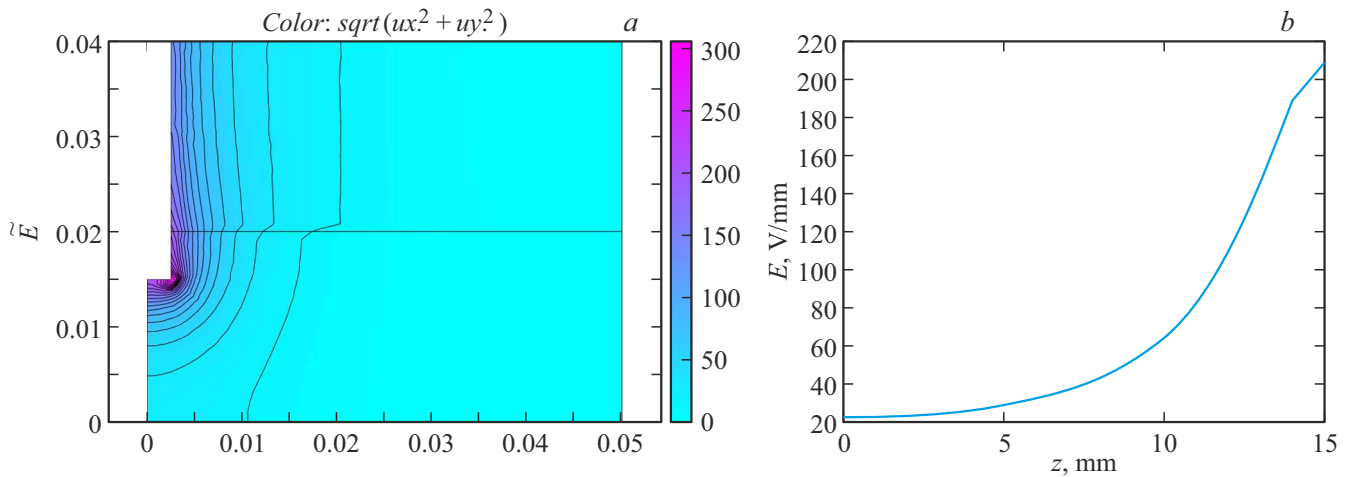
Здесь  $r$  — удельная теплота парообразования,  $\rho$  — плотность воды,  $\Delta V$  — малый объем электролита. Отсюда

$$\tau = \frac{r \rho}{\sigma E^2}.$$

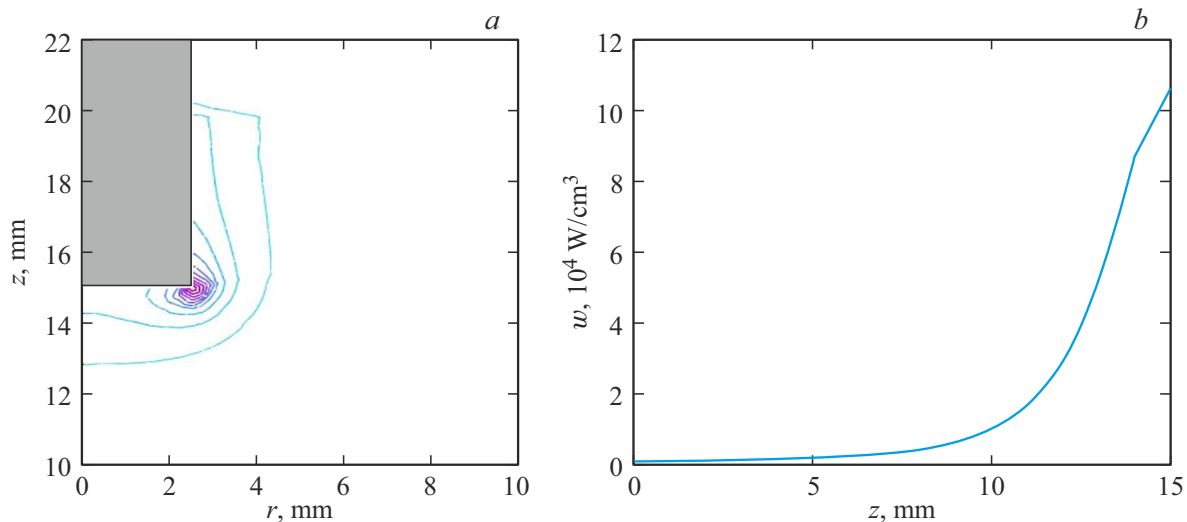
Из рис. 5, б максимальное значение  $w = \sigma E^2$  вблизи электрода равно  $\sim 1.1 \cdot 10^4$  В/мм<sup>3</sup>. Подставив это значение, получим  $\tau \approx 0.02$  с.

Свойства газоразрядной плазмы измеряются, как правило, с использованием зондовых методов, однако в ВЧ разрядах с жидкими (неметаллическими) электродами зондовая диагностика затруднительна ввиду высокой динамики процессов, протекающих в зоне горения разряда, кипения и разбрызгивания электролита, малых объемов плазмы, влияния магнитного поля и разрушения зонда. Для исключения возмущения и контакта с исследуемой плазмой, а также невосприимчивости к электромагнитным помехам выбран спектроскопический метод диагностики [21]. В то же время недостатком спектроскопического метода является то, что излучение собирается со всего объема плазмы, что затрудняет установку к какой области разряда параметры относятся.

В исследуемом спектре ВЧ разряда (рис. 6) по атомарной линии К I (766.45 нм) проверено аппаратное уширение. Минимальная ширина оптически тонких и самых узких линий составила  $\Delta \lambda G \approx 1$  нм, — она и принята за аппаратную ширину. Излучающие компоненты



**Рис. 4.** Изолинии модуля вектора напряженности  $\tilde{E}$  (a) и напряженность электрического поля  $E$  на оси симметрии ( $r = 0$ ) в промежутке от нижней пластины до электрода (b).



**Рис. 5.** Распределение объемной плотности мощности джоулевого тепловыделения (a) и объемная плотность мощности джоулевого тепловыделения  $w$  на оси симметрии ( $r = 0$ ) в промежутке от нижней пластины до электрода (b).

**Таблица 1.** Излучающие компоненты спектра

Атомы	Водород H I, Кислород O I, Калий K I, Медь Cu I, натрий Na I
Молекулы	ОН (A-X)
Континуум	300–700 nm

**Таблица 2.** Полуширина и концентрация электронов по линиям водорода из серии Бальмера ( $H_\alpha$ )

Параметры	$\Delta\lambda_f$ , nm	$\Delta\lambda_L$ , nm
Полуширина по $H_\alpha$ , nm	1.45	0.74
Концентрация электронов, $\text{cm}^{-3}$	$1.8 \cdot 10^{16}$	$7.7 \cdot 10^{16}$

спектров представлены в табл. 1. Оценка концентрации электронов в плазме ВЧ разряда рассчитывалась по полуширине нескольких водородных линий из серии Бальмера (табл. 2). Полуширина фойгтовского контура  $\Delta\lambda_F$  линии  $H_\alpha$  оказалась равна 1.45 nm.

С учетом аппаратной составляющей уширение линии вследствие эффектов давления (лоренцевская ширина)

линии определялась по формуле

$$\Delta\lambda_F \approx 0.5346\Delta\lambda_L + \sqrt{0.2166\Delta\lambda_L^2 + \Delta\lambda_G^2},$$

где  $\Delta\lambda_G$  — ширина гауссовского контура,  $\Delta\lambda_F$  — ширина фойгтовского контура,  $\Delta\lambda_L$  — ширина лоренцевского контура. Для водородной линии  $H_\alpha$  из серии



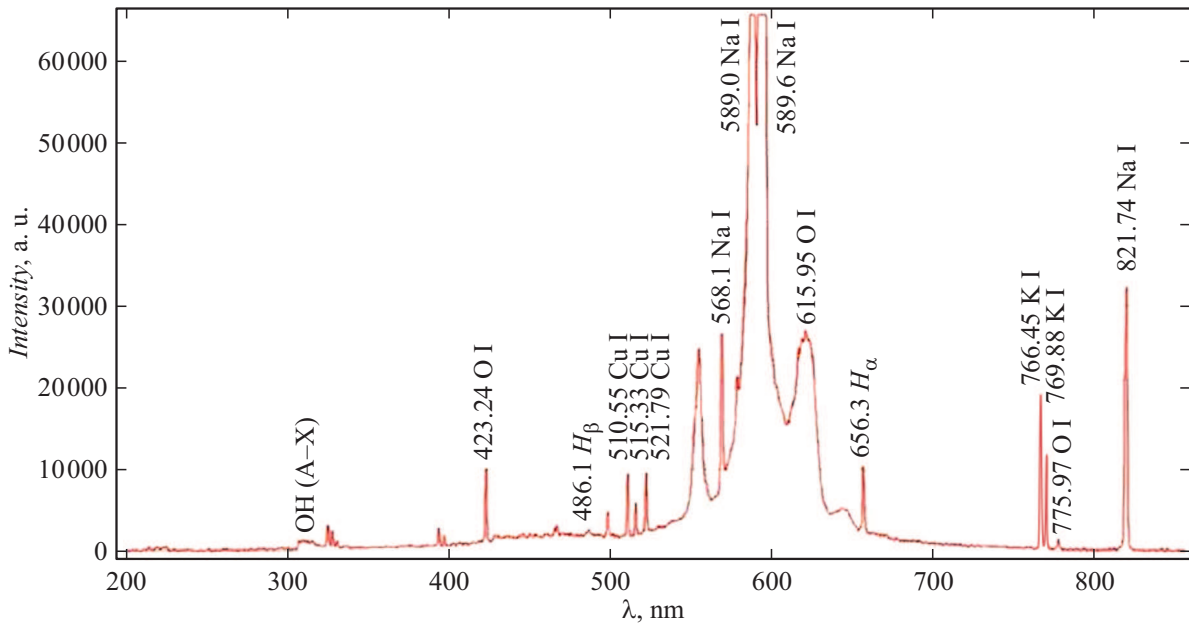


Рис. 6. Исследуемый спектр с отождествленными спектральными линиями.

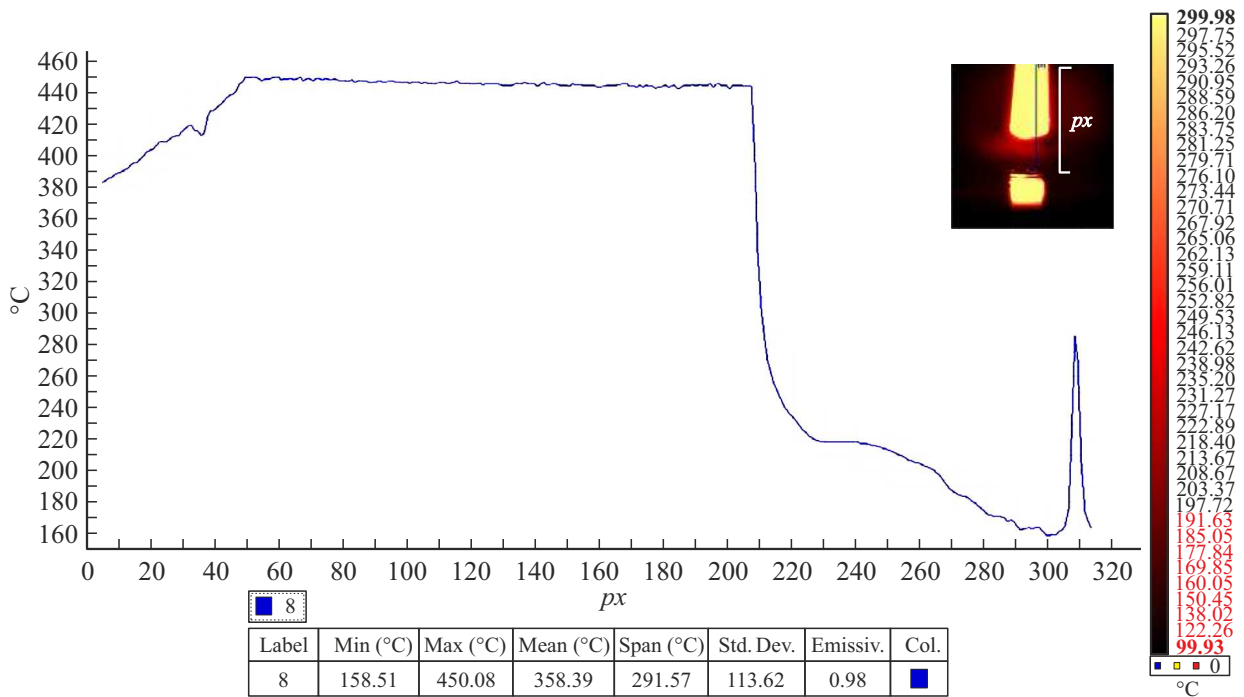


Рис. 7. Термограмма поверхности металлического и электролитического электродов в условиях горения ВЧ разряда.

Бальмера ширина лоренцевского контура составляет  $\Delta\lambda_L = 0.74 \text{ nm}$ .

Согласно справочнику [22], для  $H_\alpha$  величина  $\Delta\lambda_L = 1.45 \text{ nm}$  соответствует концентрации  $n_e = 7.7 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , а проверка концентрации электронов выполнена по графической зависимости в работе [23], на основании которой полуширина  $H_\alpha$  приблизительно соответствует концентрации  $n_e = 1.8 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ .

Исследованы термограммы поверхности металлического и электролитического электродов при горении между ними ВЧ разряда (рис. 7). Оценка температуры поверхности электродов проводилась в вертикальной плоскости  $px$ . Исходя из анализа полученных данных следует, что на расстоянии от 0 до 50 mm температура поверхности металлического электрода повышается от 380 до 450°C. Далее температура стабилизируется и

на расстоянии от 50 до 205 mm не меняется. В области межэлектродного промежутке от 205 до 300 mm температура уменьшается до 160°. На расстоянии от 307 до 310 mm наблюдается резкое увеличение температуры до 290°C, что соответствует зоне пятна на поверхности электролита.

Таким образом в работе исследованы свойства ВЧ разряда при погружении металлического электрода в электролит при атмосферном давлении. Проведены численные расчеты напряженности электрического поля и распределение объемной плотности мощности джоулевого тепловыделения для интерпретации условий пробоя в парогазовой смеси вблизи металлического электрода.

## Заключение

Установлено, что ВЧ разряд между металлическим и электролитическим электродами формируется в виде микроканалов в диапазоне напряжений от 1 до 3 kV, которые пульсируют в паровоздушной смеси вокруг металлического электрода. При увеличении напряжения более 3.5 kV разряд переходит в объемный (диффузный) режим горения с колебаниями тока разряда от 10 до 18 А.

Представлены результаты численных расчетов напряженности электрического поля и распределения объемной плотности мощности джоулевого тепловыделения. Вблизи металлического электрода напряженность электрического поля достигает значений 210 V/mm. Наибольшее тепловыделение происходит около кромки электрода, где электрическое поле сильно неоднородно. Исходя из рассчитанных значений напряженности электрического поля на кромке штыревого электрода возникает максимальное джоулево тепловыделение, достигающее значений 11 000 W/cm<sup>3</sup>, в дальнейшем в этой области происходит процесс образования парогазовой смеси с дальнейшим пробоем. Характерное время парообразования за счет джоулевого тепловыделения  $\tau \approx 0.02$  с.

Исходя из анализа спектральных параметров ВЧ разряда видно, что в плазме разряда присутствуют линии водорода H I, кислорода O I, калия K I, меди Cu I, натрия Na I и гидроксильной группы OH. Концентрация электронов, выполненная по оценке водородных линий серии Бальмера ( $H_{\alpha}$ ), оказалась равной  $n_e = 1.8 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ .

Из анализа термограмм видно, что температура нагруженного металлического электрода возрастает от 380 до 450°C в направлении горения ВЧ разряда. Установлено пиковое возрастание температуры до 290°C в области плазменного пятна на поверхности электролита.

## Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-29-00021).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] P.J. Bruggeman, A. Bogaerts, J.M. Pouvesle, E. Robert, E.J. Szili. *J. Appl. Phys.*, **130** (20), 200401 (2021). DOI: 10.1063/5.0078076
- [2] N.F. Kashapov, R.N. Kashapov, L.N. Kashapov. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **51** (49), 494003 (2018). DOI: 10.1088/1361-6463/aae334
- [3] D.T. Elg, H.E. Delgado, D.C. Martin, R.M. Sankaran, P. Rumbach, D.M. Bartels, D.B. Go. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, **186**, 106307 (2021). DOI: 10.1016/j.sab.2021.106307
- [4] Ал.Ф. Гайсин, Н.Ф. Кашапов, А.И. Купутдинова, Р.А. Мухаметов. *ЖТФ*, **88** (5), 717 (2018). DOI: 10.21883/JTF.2018.05.45900.2485 [A.F. Gaisin, N.F. Kashapov, A.I. Kuputdinova, R.A. Mukhametov. *Tech. Phys.*, **63** (5), 695 (2018). DOI: 10.1134/S1063784218050080]
- [5] А.В. Хлюстова. *ЖТФ*, **47**, 38 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.19.51512.18882
- [6] P. Andre, Y. Barinov, G. Faure, V. Kaplan, A. Lefort, S. Shkol'nik, D. Vacher. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **34** (20), 3456 (2001). DOI: 10.1088/0022-3727/34/24/306
- [7] V.A. Panov, L.M. Vasilyak, S.P. Vetchinin, V.Ya. Pecherkin, A.S. Saveliev. *Plasma Phys. Reports*, **44**, 882 (2018). DOI: 10.1134/S1063780X1809009X
- [8] D.L. Kirko, *Plasma Phys. Reports*, **46**, 597 (2020). DOI: 10.1134/S1063780X20060045
- [9] L.N. Bagautdinova, R.Sh. Sadriev, Az.F. Gaysin, S.Ch. Mastuykov, F.M. Gaysin, I.T. Fakhruddinova, M.A. Leushka, Al.F. Gaysin. *High Temperature*, **57**, 944 (2019). DOI: 10.1134/S0018151X19060051
- [10] E.I. Meletis, X. Nie, F.L. Wang, J.C. Jiang. *Surf. Coat. Technol.*, **150**, 246 (2002). DOI: 10.1016/S0257-8972(01)01521-3
- [11] T. Ishijima, K. Nosaka, Y. Tanaka, Y. Uesugi, Y. Goto, H. Horibe. *Appl. Phys. Lett.*, **103**, 142101 (2013). DOI: 10.1063/1.4823530
- [12] Al.F. Gaysin. *Inorganic Mater.: Appl. Research*, **8**, 392 (2017). DOI: 10.1134/S207511331703008X
- [13] A.F. Gaysin, A.K. Gil'mutdinov, D.N. Mirkhanov. *Metal. Sci. Heat Treatment*, **60**, 128 (2018). DOI: 10.1007/s11041-018-0250-1
- [14] E.E. Son, I.F. Suvorov, S.V. Kakurov, Al.F. Gaisin, G.T. Samitova, T.L. Solov'eva, A.S. Yudin, T.V. Rakhletsova. *High Temperature*, **52**, 490 (2014). DOI: 10.1134/S0018151X14040208
- [15] Y.P. Raizer, M.N. Shneider, N.A. Yatsenko. *Radio-Frequency Capacitive Discharges* (CRC Press, London, 1995), p. 304. DOI: 10.1201/9780203741337
- [16] Y. Sakiyama, D.B. Graves, Chang Hung-Wen, T. Shimizu, G.E. Morfill. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **45**, 425201 (2012). DOI: 10.1088/0022-3727/45/42/425201
- [17] Y.P. Raizer, J.E. Allen, V.I. Kisin. *Gas Discharge Physics* (Springer, Berlin, 1997), p. 449.
- [18] A.F. Gaisin, F.M. Gaisin, V.S. Zheltukhin, E.E. Son. *Plasma Phys. Reports*, **48**, 48 (2022). DOI: 10.1134/S1063780X22010068



- [19] В.С. Желтухин, Ал.Ф. Гайсин, С.Ю. Петряков. Письма в ЖТФ, **48**, 24 (2022).  
DOI: 10.21883/PJTF.2022.17.53283.19237
- [20] И.Н. Садовский, А.В. Кузьмин, Е.А. Шарков, Д.С. Сазонов, Е.В. Пашинов, А.А. Ашеко, С.А. Батулин. *Анализ моделей диэлектрической проницаемости водной среды, используемых в задачах дистанционного зондирования акваторий* (ИКИ РАН, М., 2013), с. 59.
- [21] В.В. Анциферов. ЖТФ, **68** (10), 32 (1997).
- [22] Г.А. Касабов, В.В. Елисеев. *Спектроскопические таблицы для низкотемпературной плазмы: справочник* (Атомиздат, М., 1973), с. 160.
- [23] В.Н. Очкин. *Спектроскопия низкотемпературной плазмы* (Физматлит, М., 2006), с. 472.