

## ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ РАЗРЯД СО СТРУЙНЫМ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМ ЭЛЕКТРОДОМ

© 2022 г. Ал. Ф. Гайсин<sup>a,\*</sup>, Ф. М. Гайсин<sup>a</sup>, В. С. Желтухин<sup>a</sup>, Э. Е. Сон<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

<sup>b</sup> Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

\*e-mail: [almaz87@mail.ru](mailto:almaz87@mail.ru)

Поступила в редакцию 20.05.2021 г.

После доработки 20.07.2021 г.

Принята к публикации 22.08.2021 г.

Исследован ВЧ-разряд ( $f = 13.56$  МГц), генерируемый между струйным электролитическим (3% раствор сульфата аммония в очищенной воде) и металлическим (медная пластина марки М1) электродами в диапазоне давлений  $p = 10^5 - 3 \times 10^4$  Па. Зажигание высокочастотного (ВЧ) разряда осуществлялось путем подачи струи электролита на поверхность медной пластины в разрядной камере. Рассмотрены типы и формы, генерируемых в межэлектродном промежутке плазменных структур и их взаимные переходы при изменении напряжения. Описаны гидрогазодинамические процессы в зоне горения ВЧ-разряда, в том числе оптически неоднородные газовые потоки, возмущения струйного электрода и образование капель. Рассмотрены термограммы поверхности струйного и металлического электродов в условиях горения ВЧ-разряда. С помощью эмиссионной спектроскопии исследован состав плазмы, концентрация электронов и температура тяжелой компоненты.

**Ключевые слова:** газоразрядная плазма, плазменно-жидкостные системы, ВЧ-разряд, электролиты, эмиссионная спектроскопия, Шлирен-метод (метод Теплера), термограммы, высокоскоростная съемка

DOI: 10.31857/S0367292122010061

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Газоразрядная плазма с жидкими (неметаллическим) электродами представляет собой быстро развивающуюся междисциплинарную область исследований, включающую в себя науку о плазме, гидрогазодинамике, тепломассопереносе, многофазной химии и фотолитизе [1]. В отличие от разрядов между твердыми электродами (тлеющий, дуговой, искровой, коронный и др.) [2], разряды в плазменно-жидкостных системах генерируются постоянным или переменным током в межэлектродном промежутке, где один или оба электрода являются проточной или непроточной жидкостью [3]. В качестве жидкого электрода, как правило, применяются растворы солей различных концентраций в технической, дистиллированной или водопроводной воде. Для устранения флуктуаций при проведении эксперимента, обусловленных составом водопроводной воды, ее подвергают предварительной очистке. Зажигание разряда в плазменно-жидкостных системах осуществляется при различных типах и конфигурациях электродов в газоразрядной камере. Исследования разряда со струйными электродами осу-

ществляют при струйном, струйно-капельном и капельном режимах течения электролита.

Большой интерес к низкотемпературной плазме разрядов плазменно-жидкостных систем связан с их успешным применением для обработки поверхности изделий [4–7], получения наночастиц [8–10], нанесения функциональных покрытий [11, 12], оценки содержания частиц в жидкости [13, 14], реакторов плазмы [15, 16], производства мелкодисперсных порошков, применяемых в аддитивных технологиях [17], очистки воды и воздуха [18]. Широкое разнообразие применений таких разрядов связано с большим количеством возможных конфигураций разрядных камер, режимов и параметров зажигания и горения разряда, а также с едиными плазмохимическими процессами, связанными с переносом вещества и зарядом на границе раздела фаз [19, 20].

Сакияма и др. [21] обнаружили, что в физико-химических процессах, протекающих в плазменно-жидкостных системах, насчитываются более 50 заряженных и нейтральных атомных и молекулярных частиц, которые вступают в реакции друг с другом и влияют на баланс энергии в разряде.

В работах [22–24] исследованы электрические разряды постоянного тока с жидкими электродами при атмосферном давлении. Установлено, что разряд устойчиво горит в воздухе при атмосферном давлении в диффузной (объемной) форме в межэлектродном зазоре 4–10 мм при питании постоянным током 40–100 мА и при плотности тока  $\sim 10^4$  А/м<sup>2</sup>. Выявлено, что разряд разделяется на две приэлектродные области и практически однородный столб. Установлено, что разряд генерирует существенно неравновесную плазму: температура газа  $\approx 2000$  К в столбе разряда, температура (средняя энергия) электронов  $\approx 4500$  К, а их средняя концентрация  $\approx 10^{18}$  м<sup>-3</sup>.

В работе [25] применены методы оптической эмиссионной спектроскопии для диагностики параметров плазмы с жидкими электродами. Выявлено сильное излучение ОН- (А-Х) и водородных линий при контакте плазмы с жидкостью. По двум водородным линиям  $H_{\alpha}$  и  $H_{\beta}$  определена концентрация электронов в диапазоне  $10^{21}$ – $10^{23}$  м<sup>-3</sup>.

В статье [26] исследованы процессы электрического разрушения и деформации поверхности воды между металлическим и жидким электродами для малых межэлектродных расстояний (2–12 мм). Представлены расчеты деформации поверхности воды в зависимости от приложенного напряжения и начального межэлектродного интервала. Результаты расчетов сравниваются с измерениями высоты воды. Для расстояний меньше 7 мм расчетный предел устойчивости поверхности воды соответствует экспериментально полученному пробивному напряжению. При разрушении поверхность воды имеет конусообразную форму Тейлора. При межэлектродном расстоянии 7 мм и больше пробивное напряжение значительно ниже предела стабильности воды, проводящий канал при пробое образуется между электродным штифтом и статической поверхностью воды.

Изучалось [27] влияние проводимости воды на электрораспыление воды в сочетании с коронным разрядом, создаваемым в воздухе. Авторы использовали геометрию электродов “точка–плоскость” с анодом в виде полый иглы шприца, противоположной катоду металлической сетки. В зависимости от проводимости наблюдались различные струи: заостренные, удлиненные и быстро расширяющиеся водные нити для более низкой проводимости; в отличие от круглых, более широких и коротких быстро распадающихся нитей для более высокой проводимости.

Анализ опубликованных работ показывает, что плазменно-жидкостные системы исследуются на протяжении длительного времени, однако количество “белых пятен” в этой области науки все еще велико. Например, до сих пор мало ис-

следованными являются разряды ВЧ-тока с жидкими электродами [29], тогда как научные основы ВЧ-разрядов с твердыми электродами подробно изложены в известных работах Ю.П. Райзера, М.Н. Шнейдера, Н.А. Яценко и др. [2, 28].

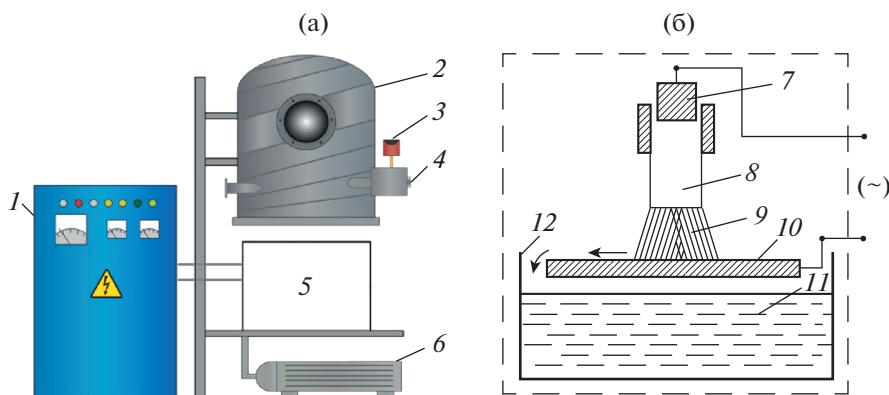
Целью данной работы является исследование свойств ВЧ-разряда, зажигаемого между струйным электролитическим и металлическим электродами. Результаты научной работы могут быть использованы как для разработки математических моделей ВЧ-разрядов с жидкими электродами, так и для инженерных методов расчета плазменных установок.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 представлена функциональная схема экспериментальной установки с газоразрядной камерой для зажигания и поддержания ВЧ-разряда в рассматриваемой конфигурации электродов. Исследование ВЧ-разряда осуществлялось при устанавливаемых параметрах: напряжения  $U = 0.1$ – $5$  кВ, давления  $p = 10^5$ – $10^4$  Па, скорости течения струи  $v_c = 0.05$ – $0.6$  м/с, длины струи  $l_c = 7$ – $30$  мм, диаметра струи  $d_c = 7$ – $30$  мм, в качестве металлического электрода применялась медная пластина марки М1 с диаметром  $d_t = 3$ – $10$  мм, в качестве электролита применялся 3% раствор сульфата аммония в очищенной водопроводной воде.

Процесс зажигания ВЧ-разряда в газоразрядной камере (рис. 1б) заключается в том, что на поверхность медного электрода 10 подается струя электролита 9 из диэлектрической трубки 8. Предварительно в диэлектрическую трубку 8 помещается металлический электрод 7 для подачи потенциала в струю электролита 9. После подачи потенциала на электроды разряд формируется вдоль струи электролита 9 и на границе раздела сред между медной пластиной 10 и струей электролита 9, далее жидкость стекает в электролитическую ячейку 12 с электролитом 11. Для контроля температуры раствора электролита в ванне предусмотрен термостат. Термостатирование электролита осуществлялось с помощью циркуляционного охладителя рефрижераторного типа. Обновление электролита в ванне осуществлялось с помощью системы подачи и откачки электролита. Для очищения раствора от примесей в системе предусмотрен фильтр грубой очистки. Удаление паров электролита из зоны исследования разряда осуществлялось с помощью стационарной вытяжки и вентилятора.

Струя электролита подавалась из электролитической ячейки со свободной поверхностью, поток является безнапорным. Скорость струи регулировалась с помощью краника и рассчитывалась



**Рис. 1.** Схема (а) – экспериментальной установки и (б) – газоразрядной камеры: 1 – ВЧ-генератор; 2 – вакуумная камера; 3 – вакуумметр; 4 – клапан для подачи воздуха в камеру; 5 – рабочая зона с газоразрядной камерой; 6 – вакуумный насос; где: 7 – металлический электрод для подачи потенциала в струю электролита; 8 – диэлектрическая трубка для подачи струи электролита; 9 – струя электролита; 10 – медный электрод; 11 – электролит; 12 – электролитическая ванна.

по формуле  $v_c = G/\rho S = G/\rho\pi(d/2)^2$ , где  $G$  – расход электролита,  $S$  – площадь сечения и  $\rho$  – плотность жидкости. Для изменения диаметра струи  $d_c$  использовались диэлектрические трубки различного наименования.

Вакуумная система экспериментальной установки состоит из вакуумной камеры, вакуумного насоса марки “2НВР5ДМ” и вакуумметра марки ВТИ 1218 класса точности 0.6. Вакуумная камера цилиндрической формы объемом 0.12 м<sup>3</sup> изготовлена из стали, размеры рабочей зоны 500 × 640 мм. Вакуумная камера имеет два иллюминатора из оптического стекла. Вакуумная камера подключена к системе откачки, измерения и регулирования давления через вакуумные фланцы. На плите вакуумной камеры расположены электрические разъемы для подключения электродов к ВЧ-генератору.

В качестве источников питания применялся ВЧ-генератор марки “ВЧГ8-60/13” с рабочей частотой 13.56 МГц. Так же на плите имеются дополнительные разъемы для подключения диагностического оборудования. Рабочее давление в вакуумной камере регулируется изменением скорости откачки и натекаем для нагнетания воздуха. Вакуумная камера поднималась и опускалась с помощью гидравлического привода.

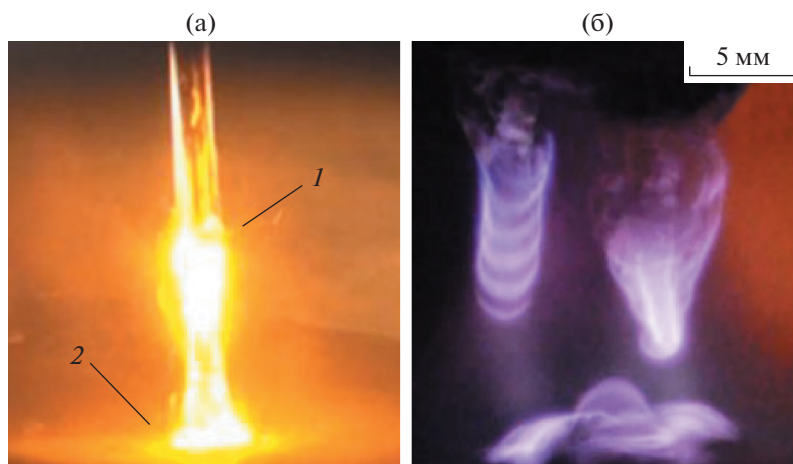
Решение указанных в работе задач достигается применением современного диагностического оборудования, методов и подходов исследований:

1. Видеосъемка динамики протекающих в зоне горения ВЧ-разряда процессов, 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 кадров в секунду. Камера устанавливалась на штатив на расстояние 300 мм 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” [30]. Дополнительное детальное исследование плазменных структур на поверхности жидкого и металлического электродов осуществлялось одновременно с помощью микроскопа “СП-52”.

2. Пространственная визуализация газогидродинамических процессов в зоне горения ВЧ-разряда осуществлялась на установке, реализующей Шлирен-метод (Метод Теплера). Преимуществом данного метода является возможность визуализировать наиболее слабые оптические неоднородности.

3. 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 от 195–1105 нм. Коллиматор подводился к зоне горения разряда на расстояние 100–200 мм. Калибровка аппаратной функции системы проводилась снятием светового излучения от лампы марки “СИРШ 6-100”. За аппаратную ширину взята ширина минимальных, одиночных и самых узких линий спектра, которая оказалась равной  $\Delta\lambda_g = 1$  нм. Исследуемое излучение собиралось со всего объема формируемого разряда, поэтому оценка состава и компонентов плазмы выполнена без привязки к определенной точке на разряде. Анализ полученных данных осуществлялся при помощи сопоставления исследуемого



**Рис. 2.** Фотографии горения ВЧ-разряда между струйным электролитическим и металлическим электродами при атмосферном (а) и пониженном давлениях (б), где 1 – зона распада струи; 2 – область контакта струи с поверхностью металлического электрода.

спектра с базой данных национального института стандартов и технологий (NIST, США). Определение значений колебательной и вращательной температур тяжелой компоненты плазмы проводилось путем сравнения экспериментально зарегистрированного молекулярного спектра с расчетной моделью в программе “LIFBASE” [31] и в программе “SPECAR 2.2.0.0” [32].

4. 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 мкм. Тепловизор обеспечивал фиксирование температуры поверхности электродов в калиброванном диапазоне от 4–2400°C. Для калибровки тепловизионной камеры использовался многоволновый пирометр. Применение пирометра было обусловлено тем, что при горении разряда могут образовываться оксидная пленка и окалина, которые могут приводить к погрешностям измеряемой температуры. Обработка полученных значений проводилась на ЭВМ с программным обеспечением “ALTAIR v5.91.010”.

5. Исследования колебаний тока и напряжения разряда ВЧ-тока производились цифровым осциллографом марки “АКТАКОМ АСК-2067” с делителем напряжения высокой частоты марки “Электроника Р6015А”.

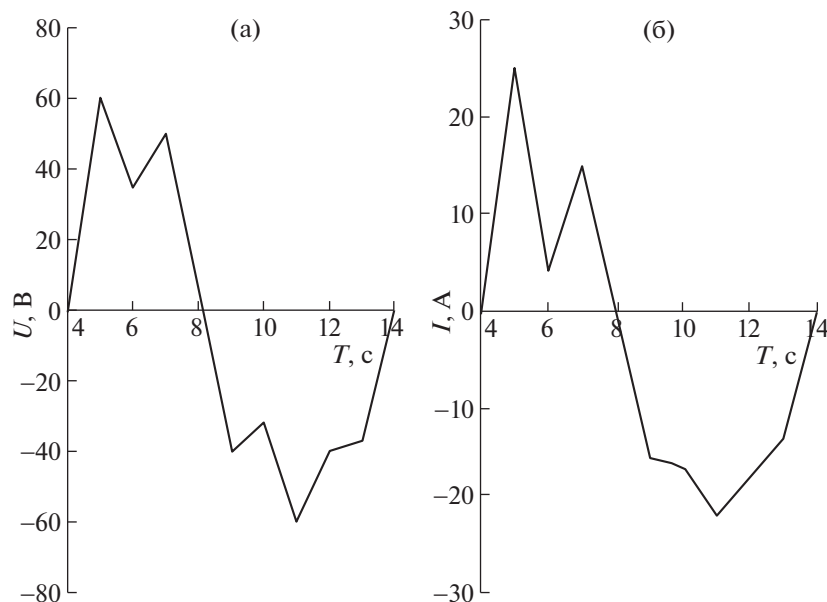
### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследование инициирования ВЧ-разряда при атмосферном давлении контактным методом струйного электролитического электрода с по-

верхностью медной пластины показало, что при подаче напряжения в диапазоне от 100 до 1000 В на границе протекает процесс испарения электролита с образованием паровоздушных пузырей различного диаметра. Протекающий в цепи ток запускает процессы джоулевого тепловыделения с поверхности медной пластины и физико-химического выделения растворенных веществ из электролита, что характерно для электролиза. Протекание процесса электролиза определяется переносом электрического тока в жидкости и условиями рекомбинации присутствующих в растворе ионов электролита. Изменяя состав, концентрацию и температуру электролита, можно изменять протекание электродных процессов в желательном направлении. В то же время пробоя не наблюдается, так как вкладываемая в разряд мощность остается недостаточной для ионизации паровоздушной среды и инициализации электронной лавины. Из анализа осциллограмм следует, что при холостом ходе величина тока соответствует 12–14 А.

При увеличении напряжения от 1000 до 2500 В интенсивность протекающих в межэлектродном промежутке процессов увеличивается, а раствор на поверхности металлического электрода начинает кипеть. В объеме электролита возникает граница разделения фаз с образованием на поверхности медной пластины паровоздушной оболочки. В некоторый момент времени напряженность электрического поля достигает значений, достаточных для пробоя газового промежутка между электродами. В результате пробоя на границе раздела сред образуются микроразряды в виде импульсов тока амплитудой от 12 до 16 А.

С повышением напряжения с 2.5 до 4 кВ разряд переходит в устойчивый режим горения, при



**Рис. 3.** Осциллограмма одного колебания напряжения (а) и тока (б) электрического разряда ВЧ-тока между жидким и медным электродами.

этом ток увеличивается до 18–25 А. Микроархивы формируются в форме усеченных конусов желтого цвета, вершины которых опираются на поверхность падающей капли, а основания — на поверхность медного электрода (рис. 2а). Установлено, что разряд преимущественно формируется в двух зонах струи: 1 — в зоне распада струи; 2 — в области контакта струи с поверхностью металлического электрода. Дальнейший рост прикладываемого напряжения до 5 кВ и более ведет к пробоем между проводящей пластиной в электролитической ванне 7 и медной пластиной 10 с образованием дуги и чрезмерной нагрузки на лампу ВЧ-генератора.

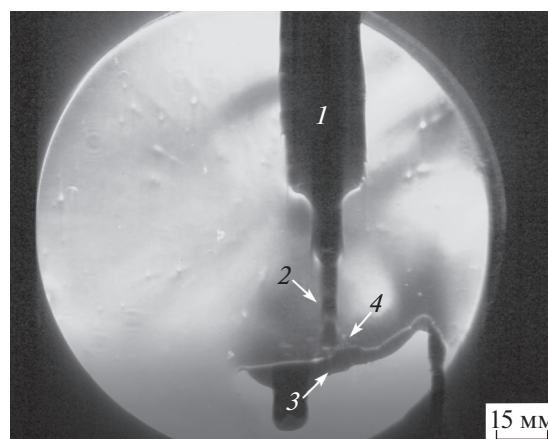
При понижении давления в вакуумной камере до  $10^4$  Па горение ВЧ-разряда характеризуется большей интенсивностью, меньшим напряжением пробоя и образованием кольцевых и полукольцевых плазменных структур вдоль струйного электрода (рис. 2б).

Анализ колебаний напряжения и тока ВЧ-разряда показал, что колебания на заземленном электроде проходят с двумя пульсациями тока и напряжения, в то время как колебания на нагруженном электроде с тремя пульсациями тока и напряжения (рис. 3).

На установке реализующей шлирен-метод проведена пространственная визуализация гидрогазодинамических процессов в зоне горения ВЧ-разряда между струйным электролитическим и медным электродами при атмосферном давлении (рис. 4). Установлено, что при подаче струи на медный электрод возникает пробой с горением

ВЧ-разряда. В зоне горения ВЧ-разряда наблюдается область интенсивного перемешивания жидкости, газа и плазмы. Данный процесс сопровождается интенсивным испарением электролита, образованием капель и выделением конвективных парогазовых потоков, где темные области соответствуют скачку уплотнения, а светлые — разрежению.

С помощью тепловизора проведено исследование области горения ВЧ-разряда между струй-



**Рис. 4.** Шлирен-изображение гидрогазодинамических процессов в зоне горения ВЧ-разряда между струйным электролитическим и медным электродами, 1 — диэлектрическая трубка для подачи струи электролита; 2 — струя электролита; 3 — медный электрод; 4 — зона горения электрического разряда.



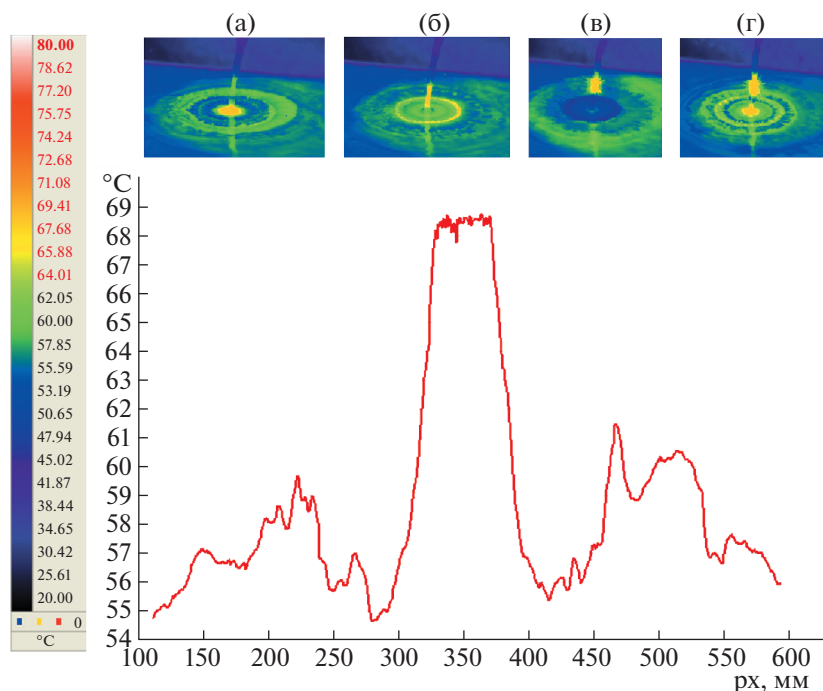


Рис. 5. Термограмма поверхности медной пластины в зоне горения ВЧ-разряда со струйным электролитическим электродом, где (а) – до пробоя; (б) – сужение струи; (в–г) – пробой и горение разряда.

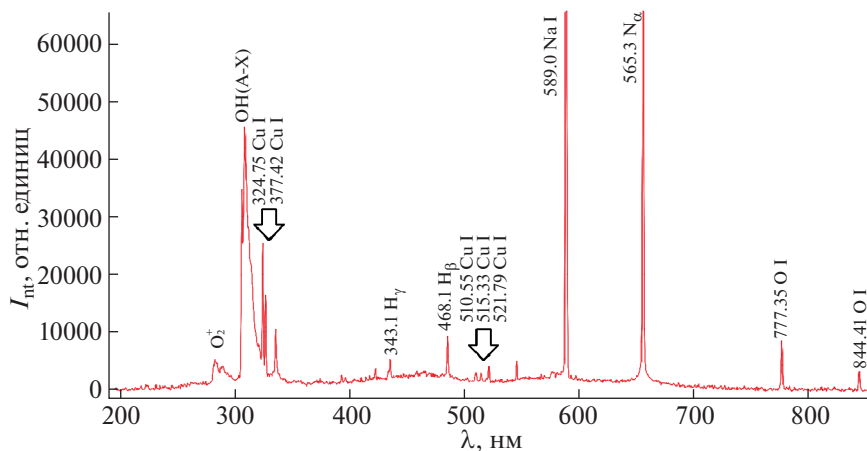


Рис. 6. Исследуемый спектр с отождествленными спектральными линиями.

ным электролитическим и медным электродами при атмосферном давлении (рис. 5). Исходя из анализа термограмм следует, что температура электролита на поверхности медного электрода в зоне горения разряда достигает  $\sim 69^\circ\text{C}$ , далее температура электролита циклично меняется, что связано с периодическим прохождением объёмов горячей и холодной жидкости.

Анализ спектров плазмы ВЧ-разряда показал, что в наблюдаемом участке присутствуют различные элементы: атомы водорода H I, натрия Na I,

меди Cu I, кислорода O I, молекулярные ионы кислорода  $\text{O}_2^+$  и гидроксил OH (A-X) (рис. 6). Оценка концентрации электронов в плазме разряда ВЧ-тока проводилась по анализу контуров водородной линии  $\text{H}_\beta$ . Определена ширина фойгтовского контура водородной линии  $\text{H}_\beta$ , которая на её полувысоте соответствует  $\Delta\lambda_f = 1.25$  нм. Лоренцевская составляющая регистрируемой линии, с учётом аппаратного уширения в предположении фойгтовского контура, равна  $\Delta\lambda_L = 0.43$  нм. Величина  $\Delta\lambda_L$ , обусловленная линей-

ным штарк-эффектом, соответствует концентрации электронов  $n_e = 3.06 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

Используемые для оценок методы определения температуры электронов предполагают наличие в плазме состояния локального термодинамического равновесия. Определение температуры электронов по приведенным выше спектрам затруднено, так как недостаточно данных по атомарным (и) или ионным линиям. Колебательная  $T_v$  и вращательная температуры  $T_r$  определялись для молекулярной полосы ОН (А-Х). Наилучшее совпадение для молекулярной полосы ОН (А-Х) получилось при температурах в диапазонах  $T_v = 3450\text{—}3570 \text{ К}$  и  $T_r = 4680\text{—}4870 \text{ К}$ .

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате экспериментальных и теоретических исследований ВЧ-разряда ( $f = 1356 \text{ МГц}$ ) между струйным электролитическим и металлическим электродами в широком диапазоне давлений установлено, что в наблюдаемом участке плазмы присутствуют различные элементы: атомы водорода H I, натрия Na I, меди Cu I, кислорода O I, молекулярные ионы кислорода  $\text{O}_2^+$  и гидроксил ОН (А-Х). Концентрация электронов, полученная по анализу водородных линий серии Бальмера, равна  $n_e = 3.06 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Путем сравнения молекулярного спектра с модельным для полосы ОН (А-Х) получены вращательная температура  $T_v = 3450\text{—}3570 \text{ К}$  и колебательная температура  $T_r = 4680\text{—}4870 \text{ К}$ .

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках выполнения государственного задания № 075-03-2020-051/6 от 06.11.2020 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bruggeman P.J., Kushner M.J., Locke B.R., Gardeniers J.G.E., Graham W.G., Graves D.B., Hofman-Caris R.C.H.M., Maric D., Reid J.P., Ceriani E., Fernandez Rivas D., Foster J.E. Garrick S.C., Gorbanev Y., Hamaguchi S., Iza F., Jablonowski H., Klimova E., Kolb J., Krma F., Lukes P., Machala Z., Marinov I., Mariotti D., Mededovic Thagard S., Minakata D., Neyts E.C., Pawlat J., Petrovic Z.Lj., Pflieger R., Reuter S., Schram D.C., Schröter S., Shiraiwa M., Tarabova B., Tsai P.A., Verlet J.R.R., T von Woedtke, Wilson K.R., Yasui K., Zvereva G. // Plasma Sources Sci. Technol. 2016. V. 25. P. 053002. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/25/5/053002>
2. Raizer Y.P., Allen J.E. Gas Discharge Physics / Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1991. V. 1. P. 449.
3. Kashapov N., Kashapov R., Kashapov L. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2018. V. 51. P. 494003. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aae334>
4. Meletis E.I., Nie X., Wang F.L., Jiang J.C. // Surf. Coat. Technol. 2002. V. 150. P. 246. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01521-3](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01521-3)
5. Ishijima T., Nosaka K., Tanaka Y., Uesugi Y., Goto Y., Horibe H. // Appl. Phys. Lett. 2013. V. 103. P. 142101. <https://doi.org/10.1063/1.4823530>
6. Gaysin A.F. // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. V. 8. P. 392. <https://doi.org/10.1134/S207511331703008X>
7. Gaysin A.F., Gil'mutdinov A.K., Mirkhanov D.N. // Metal Science and Heat Treatment. 2018. V. 60. P. 128. <https://doi.org/10.1007/s11041-018-0250-1>
8. Wüthrich R., Allagui A. // Electrochim. Acta. 2010. V. 55. P. 8189. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2010.01.096>
9. Abdul K.T., Kaliani A. // Ionics. 2012. V. 18. P. 315.
10. Saito G., Hosokai S., Tsubota M., Akiyama T. // J. Appl. Phys. 2011. J. Appl. Phys. V. 110. P. 023302. <https://doi.org/10.1007/s11090-011-9313-4>
11. Paulmier T., Bell J.M., Fredericks P.M. // Thin Solid Films. 2007. V. 515. P. 2926. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2006.08.027>
12. Quan C., He Y. // Surf. Coat. 2015. V. 269. P. 319.
13. Mezei P., Czerfalvi T., Janossy M. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1998. V. 31. L41.
14. Smoluch M., Mielczarek P., Silberring J. // Mass Spectrom. Rev. 2016. V. 35. P. 22. <https://doi.org/10.1002/mas.21460>
15. Becker K.H., Schoenbach K.H., Eden J.G. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2006. V. 39. R55. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/39/3/R01>
16. Gao S.Z., Ma D., Lu Q., Li Y., Li X., Yang W. // Plasma Chem. Plasma Process. 2010. V. 30. P. 873. <https://doi.org/10.1007/s11090-010-9251-6>
17. Kashapov R., Kashapov L., Kashapov N. // J. Phys: Conf. Ser. 2017. V. 927. P. 012086. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/927/1/012086>
18. Son E.E., Sadriev R.Sh., Gaisin A.F., Bagautdinova L.N., Gaisin F.M., Shakirova E.F., Akhatov M.F., Gaisin Az.F., Kayumov R.R. // High Temperature. 2014. V. 52. P. 939. <https://doi.org/10.1134/S0018151X14060169>
19. Bruggerman P., Christophe L. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. V. 42. P. 053001. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/42/5/053001>
20. Samukawa S., Hori M., Rauf S., Tachibana K., Bruggeman P., Kroesen G., Whitehead J.C., Murphy A., Gutsol A., Starikovskaia S. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2012. V. 45. P. 253001. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/25/253001>
21. Sakiyama Y., Graves D.B., Chang H.W., Shimizu T., Morfill G. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2012. V. 45. P. 425201. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/42/425201>
22. Andre P., Barinov Y., Faure G., Shkol'nik S.M. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2011. V. 44. P. 375203. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/37/375203>

23. *Andre P., Barinov Y., Faure G., Shkol'nik S.M.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2011. V. 44. P. 375202. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/37/375202>
24. *Gaisin A.F., Kuputdinova A.I., Mukhametov R.A., Kashapov N.F.* // Technical Physics. 2018. T. 63. № 5. P. 695.
25. *Bruggeman P., Verreycken T., Manuel G., Walsh J.L., Kong M.G., Leys C., Schram D.C.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. V. 43. P. 124005. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/12/124005>
26. *Bruggeman P., Leigh G.L., Degroote J.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2007. V. 40 P. 4779. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/16/007>
27. *Pongr Br., Hyun-Ha Kim, Negishi N., Machala Z.* // The Europ. Phys. J. D. 2014. V. 68. P. 224. Doi: <https://doi.org/10.1140/epjd/e2014-50052-4>
28. *Raizer Yu.P., Shneider M.N., Yatsenko N.A.* // Radio-Frequency Capacitive Discharges. New York: CRC Press, Boca Raton, 1995. P. 304.
29. *Gaisin A.F., Son E.E., Petryakov S.Yu.* // Plasma Physics Reports. 2017. V. 43. P. 741. <https://doi.org/10.1134/S1063780X17070054>
30. <https://www.movavi.ru/>
31. <https://lifbase.software.informer.com/2.0/>
32. <http://spectralfit.com/>