

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ
ПЛАЗМА

УДК 537.523.9

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА
С НАХОДЯЩИМСЯ В ВОДНОМ ПОТОКЕ МЕДНЫМ КАТОДОМ

© 2017 г. Г. Х. Тазмеев^{a,*}, Б. А. Тимеркаев^{a,**}, Х. К. Тазмеев^{b,***}

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

^b Казанский (Приволжский) федеральный университет, Набережночелнинский институт, Россия

*e-mail: tazmeevg@mail.ru

** e-mail: btimerkaev@gmail.com

*** e-mail: tazmeevh@mail.ru

Поступила в редакцию 20.06.2016 г.

Окончательный вариант получен 22.12.2016 г.

Экспериментально исследован газовый разряд постоянного тока между медными электродами в диапазоне токов 5–20 А. Межэлектродное расстояние варьировалось в пределах 45–70 мм. Катод представлял собой стержень с диаметром 10 мм и находился в потоке воды, вытекающем из диэлектрической трубки. Рассмотрены три варианта, которые различались расположением рабочего торца катода: 1) над водой; 2) вровень с поверхностью воды; 3) под водой. Наиболее подробно изучены электрические и оптические характеристики газового разряда во втором варианте. Установлено, что газовый разряд обладает свойствами электрической дуги. В третьем варианте обнаружена значительная эрозия катода. Выявлено, что в процессе эрозии образуются мелкодисперсные частицы металлической меди.

DOI: 10.7868/S0367292117070137

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы наблюдается значительное повышение интереса к газовым разрядам, возбуждаемым в присутствии водной среды. Исследуются различные виды газовых разрядов. Импульсные высоковольтные газовые разряды под водой и на водной поверхности изучаются как источники ультрафиолетового излучения и химически активных веществ [1–7]. Одним из практических приложений рассматривается обеззараживание воды [8, 9]. Перспективными для деструкции органических соединений и стерилизации сточных вод являются низковольтные подводные разряды [10, 11]. Немало исследований посвящено применению газовых разрядов для синтеза наночастиц под водой и в водных растворах [12–15]. В обзорных статьях перечисляются десятки способов осуществления этого процесса [16–18]. Изучаются плазменные процессы, происходящие при контакте газовых разрядов с водой в атмосфере гелия, аргона и других газов [19–21]. В новых условиях взаимодействия газового разряда с водой более детально раскрываются его физико-химические свойства.

Целью настоящей работы явилось экспериментальное исследование газового разряда постоянного тока в воздухе при условии нахождения металлического катода в потоке воды. Чаще

всего твердотельный катод полностью погружается в водный поток. Такое расположение катода встречается во многих работах [22–28]. В вариантах, когда металлический катод выступает из водного потока или близок к такому положению, газовый разряд изучен мало. Данная работа относится к этим вариантам.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Газовый разряд зажигался между медным стержнем, находящимся в катодном узле 1, и медным водоохлаждаемым диском 2, который использовался в качестве анода. Исследования проводились в диапазоне токов 5–20 А.

Электрическое питание подавалось от трехфазного двухполупериодного выпрямителя, у которого напряжение на выходе составляло 1200 В. Пульсации напряжения сглаживались емкостно-индукционным фильтром *C-L-C*. Напряжение измерялось вольтметром *VI* (стрелочный прибор М2015 класса точности 0.2) с применением добавочного сопротивления *RI*. Это же сопротивление *RI* и вольтметр *VI* служили делителем напряжения при регистрации электрических сигналов с помощью осциллографа 3. Ток измерялся амперметром *A* (многопредельный стрелочный прибор

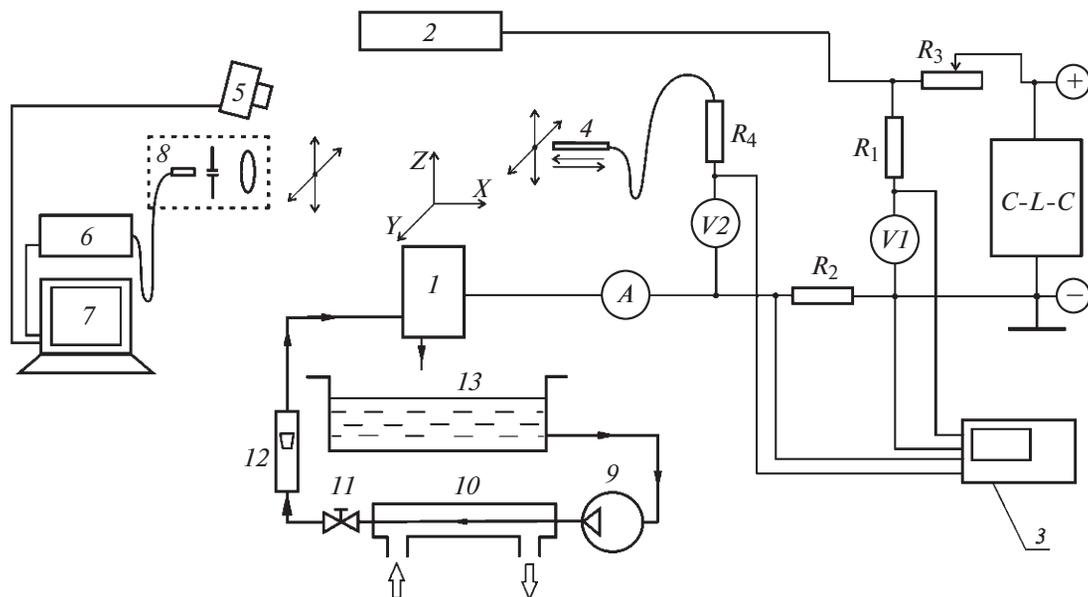


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

М2016 класса точности 0.2) и регистрировался осциллографом 3. Электрический сигнал для регистрации осциллограммы разрядного тока формировался при помощи шунта R_2 с сопротивлением 0.50 Ом. Регулирование тока осуществлялось балластным резистором R_3 путем ступенчатого изменения его электрического сопротивления от 150 Ом до нуля.

Для измерения электрического поля в плазменном столбе использовался зонд 4, представлявший собой вольфрамовый провод с диаметром 0.4 мм, который был вставлен в капиллярную трубку из кварцевого стекла. Длина его открытого участка составляла 0.5 мм. Зонд вводился в плазменный столб на короткое время при помощи электромагнита с пружинным механизмом. Его пространственное положение менялось координатным устройством, который обеспечивал перемещение в вертикальном и горизонтальном направлениях. В измерительной цепи использовался резистор R_4 с электрическим сопротивлением 12 МОм. В одной и той же вертикальной координате z совершалось многократное возвратно-поступательное движение зонда вдоль оси X . При этом менялась его координата u в пределах ± 3 мм относительно вертикальной оси симметрии газоразрядной области. За результат измерения принималось максимальное значение плавающего потенциала зонда, зафиксированное на осциллограммах. Напряжение U , ток I и плавающий потенциал ϕ регистрировались цифровым запоминающим осциллографом АКПП-15/1 с полосой пропускания 25 МГц.

Фотографирование и спектроскопия газового разряда осуществлялись скоростной видеокамерой ВИДЕОСКАН-415 и высокоскоростным оптоволоконным спектрометром AvaSpec-3648. Видеокамера позволяла получить кадры с экспозицией до 1 мкс. Спектрометр регистрировал излучение в диапазоне длин волн 484–708 нм с разрешением 0.15 нм (дифракционная решетка 1200 штрихов/мм, входная оптическая щель 10 мкм). Информация от видеокамеры 5 и спектрометра 6 передавалась компьютеру 7 (рис. 1).

Излучение от отдельных участков разрядной области проецировалось на вход спектрометра 6 через узел 8, скомбинированный из собирающей линзы и оптической щели. Этот оптический узел 8 передвигался в вертикальном (вдоль оси Z) и горизонтальном (вдоль оси Y) направлениях при помощи координатного устройства.

В опытах использовалась дистиллированная вода с небольшим содержанием хлорида натрия. Ее удельная электрическая проводимость σ измерялась кондуктометром АНИОН 4150. Она находилась в диапазоне 120–370 мкСм/см, что существенно меньше, чем у водопроводной воды. С помощью гидронасоса 9 вода пропусклась через теплообменник 10. Расход воды через катодный узел регулировался вентилем 11 и контролировался поплавковым ротаметром 12. Тепло, уносимое из катодного узла водой, принималось за тепловые потери на катоде Q_c . Они определялись калориметрическим способом. Для этого измерялась температура воды хромель-алюмелевыми термопарами, установленными на входе в катодный узел и на его выходе.

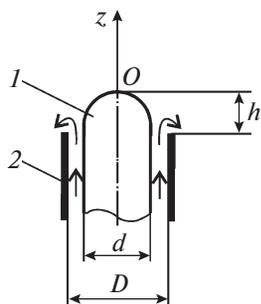


Рис. 2. Катодный узел. $d = 10$ мм; $D = 12.7$ мм. Стрелками указано направление течения воды.

Вода из катодного узла стекала в сборную емкость 13. В ряде опытов вода в течение фиксированного промежутка времени набиралась в мерную посуду, расположенную над сборной емкостью. Такие опыты проводились для определения потоков воды m^* и m через катодный узел, соответственно, во время горения газового разряда и в случае его отсутствия. Разность этих двух величин Δm рассматривалась как унос массы воды под воздействием газового разряда.

На рис. 2 представлено схематичное изображение катодного узла. Медный стержень 1 был смонтирован внутри диэлектрической трубки 2. Самая верхняя точка O закругленного торца стержня принималась за начало отсчета координаты z . Перемещением стержня в вертикальном направлении (вдоль оси Z) регулировался выступ h из трубки. Вода подавалась в зазор, образованный между медным стержнем 1 и диэлектрической трубкой 2.

Опыты проводились при различных выступах h медного стержневого катода. Для проведения детальных исследований были выделены три варианта. Характерным признаком, различающим эти варианты друг от друга, послужило положение верхнего края торца катода относительно уровня воды в диэлектрической трубке (рис. 3).

Для накопления продуктов эрозии медного катода вода, стекающая из катодного узла, отбиралась в прозрачную стеклянную емкость. Далее производилась седиментация в течение суток. Осадок высушивался при температуре менее 40°C . Сухой осадок изучался люминесцентным микроскопом ЛЮМАМ-ИЗ при увеличении 320.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Фотографии. На рис. 4 представлены фотографии газового разряда, характерные для 3-х разных вариантов нахождения медного катода в потоке воды. Налицо наличие существенных различий.

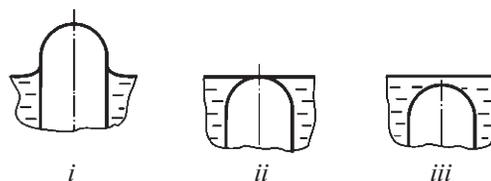


Рис. 3. Варианты нахождения медного катода в водном потоке. Торца медного катода: *i*) — над водой; *ii*) — уровень с поверхностью воды; *iii*) — под водой.

В варианте (*i*) выделяются яркие приэлектродные области с зеленым оттенком и бледный плазменный столб. В варианте (*ii*) около катода вырисовывается ярко светящийся узкий канал алого цвета, вокруг которого имеется ореол желтого цвета. В третьем варианте (*iii*) наблюдается окрашивание плазменного столба в зеленый цвет на всей протяженности, что явно указывает на интенсивное поступление атомов меди в разрядную область.

Повышение тока приводит к удлинению узкого разрядного канала, возникающего в варианте (*ii*), см. рис. 5. При этом происходит также значительное расширение этого канала. Таким образом, в моментальных фотографиях газового разряда отчетливо проявляется наличие в плазменном столбе протяженной зоны с отличительными свойствами. Она примыкает к медному катоду, верхний торец которого находится вровень с поверхностью воды.

Электрические характеристики. В вариантах (*i*) и (*ii*) разряд горел устойчиво. Его электрические параметры были стабильны и практически не менялись во времени (рис. 6). В варианте (*iii*) возникли беспорядочные пульсации тока и напряжения. Частота пульсаций менялась в широких пределах и в максимуме доходила до десятков мегагерц.

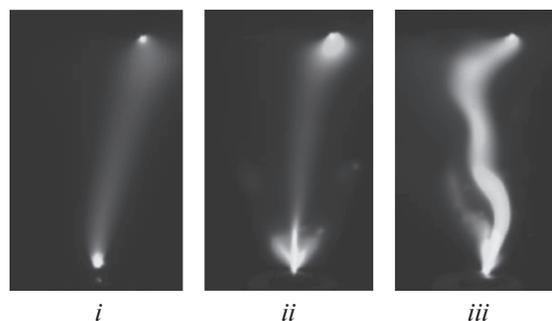


Рис. 4. Мгновенные фотографии газового разряда при разных вариантах нахождения медного катода в потоке воды. Экспозиция 200 мкс. *i*) — $h = 5$ мм; *ii*) — 2 мм; *iii*) — 0 мм. $m = 1.5$ г/с. Среднее значение тока: *i*) — $\langle I \rangle = 10.0$ А; *ii*) — 9.7 А; *iii*) — 8.7 А. Межэлектродное расстояние: *i*) — 45 мм; *ii*) — 48 мм; *iii*) — 50 мм.

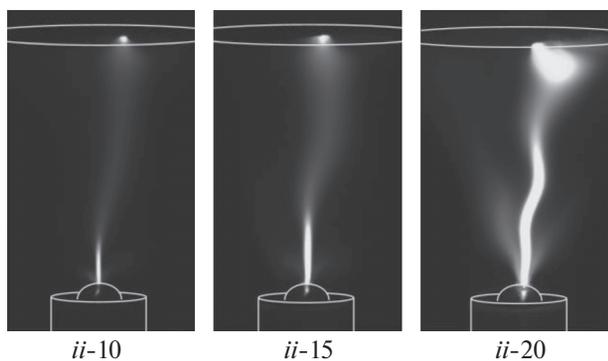


Рис. 5. Мгновенные фотографии газового разряда в варианте (ii) при разных токах. Белыми линиями обозначены очертания катодного узла и анода. Экспозиция 60 мкс. $m = 1.5$ г/с. Межэлектродное расстояние 50 мм.

Возникновение пульсаций свидетельствует об интенсивном взаимодействии газового разряда с потоком воды. Результат такого взаимодействия визуально проявлялся в непрерывном хаотичном изменении геометрии разрядного канала.

На рис. 7 приведены распределения плавающих потенциалов ϕ вдоль плазменного столба в варианте (ii) при различных разрядных токах. Как видно, результаты измерений ϕ вполне удовлетворительно могут быть аппроксимированы двумя линейными функциями. Это обстоятельство, наряду с мгновенными фотографиями, еще раз свидетельствует о неоднородности плазменного столба. Углы наклона аппроксимирующих прямых линий k и l получились одинаковыми при разных межэлектродных расстояниях (на рис. 7

показаны результаты при 70 и 50 мм). Эти углы наклона менялись при варьировании тока.

Линейные зависимости ϕ от координаты z были использованы для нахождения напряженности электрического поля в плазменном столбе. Результаты представлены в табл. 1.

Как следует из данных табл. 1, электрическое поле сильнее в зоне, примыкающей к катоду (аппроксимация прямой k). Причина этого обстоятельства, по-видимому, заключается в следующем. Около катодного пятна происходит интенсивное испарение воды. Пары воды охлаждают плазменный столб, и он сужается, вызывая увеличение напряженности электрического поля.

Оптические свойства. На рис. 8 представлен спектр излучения в видимой области одного из малых участков яркого разрядного канала, примыкающего к катоду в варианте (ii). Спектр можно считать практически мгновенным, т.к. время интегрирования ПЗС-матрицы спектрометра составило всего 0.5 мс. Здесь же дан фрагмент спектра, зарегистрированного при многократно увеличенном времени интегрирования. Как видно, наиболее интенсивными являются спектральные линии H_{α} и H_{β} . В панорамном спектре наиболее интенсивными являются спектральные линии H_{α} и H_{β} . Такая картина указывает на то, что в видимом диапазоне преобладает излучение атомов водорода. Поэтому в мгновенных фотографиях прикатодная зона плазменного столба окрашена в алый цвет, который соответствует бальмеровской спектральной линии H_{α} .

Кроме водорода в излучении участвуют атомы меди. Спектральные линии меди проявлялись при увеличении времени интегрирования до 100 мс и более (фрагмент спектра на рис. 8).

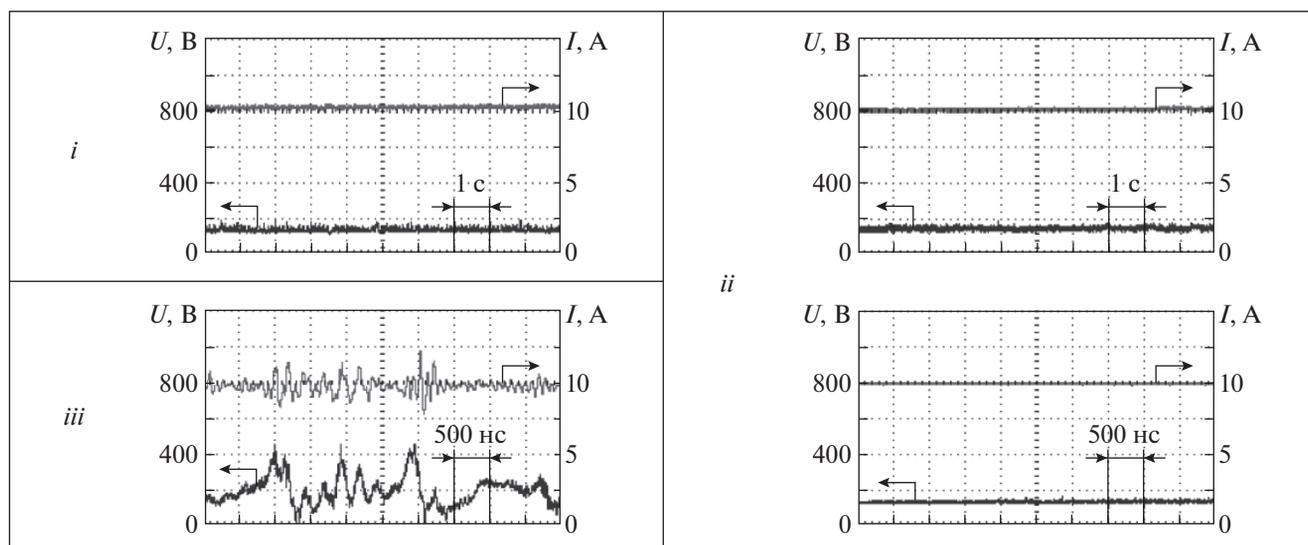


Рис. 6. Осциллограммы тока и напряжения. $m = 1.5$ г/с. $\sigma = 350\text{--}370$ мкс/см. Межэлектродное расстояние 50 мм.

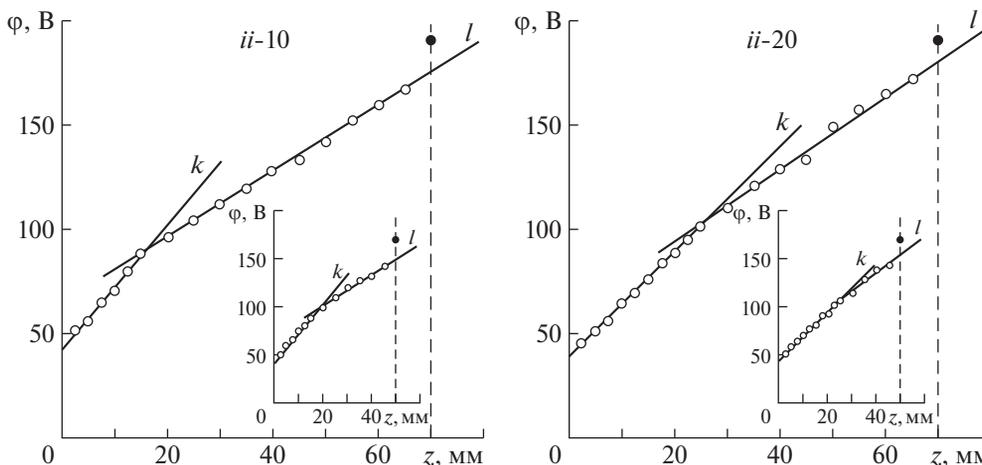


Рис. 7. Распределения плавающих потенциалов вдоль плазменного столба. Штриховой линией обозначена верхняя граница разрядного промежутка. Черная точка на этой линии соответствует напряжению между катодом и анодом. $m = 1.5 \text{ г/с}$. $\sigma = 200\text{--}220 \text{ мкСм/см}$.

В опытах спектры регистрировались с максимально возможной быстротой. Промежуток времени между двумя последовательными регистрациями составил всего 0.1 с. Тем не менее, интенсивности спектральных линий менялись от спектра к спектру. Естественно, причин может быть множество. В работе внимание было уделено внешним проявлениям закономерностей излучения плазменного столба, не вникая в детали этих причин. В частности, была установлена зависимость максимальной интенсивности спектральной линии H_{α} от координаты z при разных токах. Результаты измерений представлены на рис. 9. Как видно, с ростом тока интенсивность спектральной линии H_{α} возрастает, и при этом она остается достаточно высокой на значительном удалении от катода. Наличие таких закономерностей визуально отчетливо просматривается

на мгновенных фотографиях. При повышении тока ярко светящийся участок плазменного столба расширяется и удлиняется (рис. 5). Это означает, что число излучающих атомов увеличивается и пропорционально им меняется световой поток на входе в спектрометр.

Наличие в спектре излучения линий меди, а также бальмеровских линий H_{α} и H_{β} позволило рассчитать электронную температуру T_e по методу относительных интенсивностей. Необходимые для расчета постоянные были взяты из [29]. Результаты расчета, выполненного для варианта с током 19.8 А, приведены в табл. 2. Здесь $T_{e \text{ max}}$ (Cu) и $T_{e \text{ max}}$ (H) — максимальные значения температуры, рассчитанные по спектральным линиям, соответственно, меди и водорода. Наблюдается некоторое снижение электронной температуры по мере удаления от катода, что свидетельствует об уменьшении энергии, приобретаемой электрона-

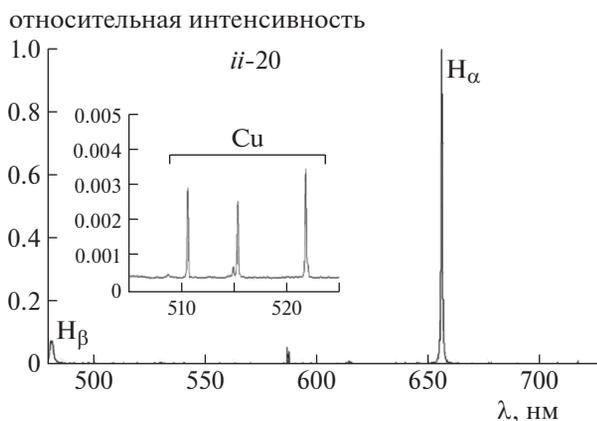


Рис. 8. Спектр излучения. $z = 4 \text{ мм}$. $I = 19.8 \text{ А}$. $m = 1.5 \text{ г/с}$. $\sigma = 220 \text{ мкСм/см}$. Ширина щели 0.20 мм.

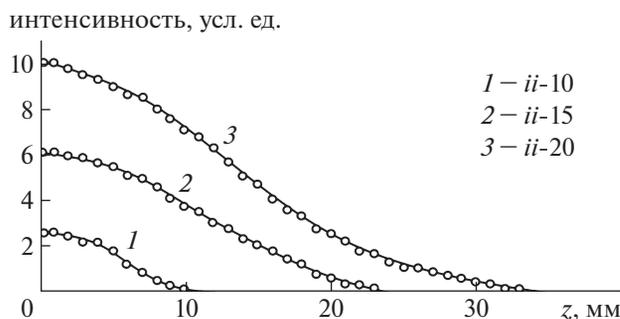


Рис. 9. Максимальная интенсивность спектральной линии H_{α} . 1 — $I = 9.7 \text{ А}$; 2 — 15.0 А ; 3 — 19.8 А . $m = 1.5 \text{ г/с}$. $\sigma = 200\text{--}250 \text{ мкСм/см}$. Ширина щели 0.20 мм. Межэлектродное расстояние 50 мм.

Таблица 1. Результаты графической обработки распределений потенциала в плазменном столбе

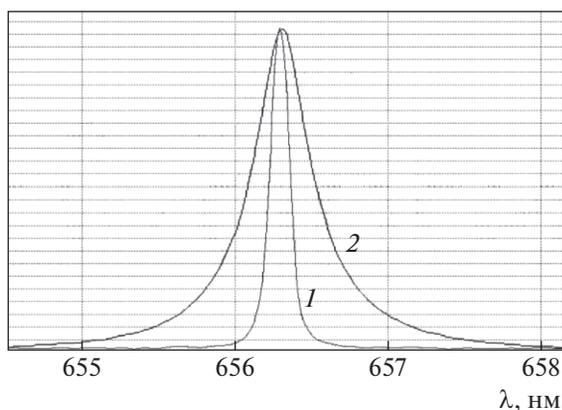
I, A	Аппроксимирующая прямая	$E, В/см$
9.7	k	30 ± 1
	l	16 ± 1
19.8	k	26 ± 1
	l	19 ± 1

ми от электрического поля. Такой результат является вполне ожидаемым, т.к. напряженность электрического поля также становится меньше вдали от катода.

Изучение профилей спектральных линий H_α и H_β показало, что эти линии уширяются при повышении тока. Наглядная картина этого явления для H_α приведена на рис. 10. Изменение профилей спектральных линий H_α и H_β наблюдается и вдоль оси z . При удалении от катода их ширина $\Delta\lambda_{1/2}$ уменьшается (табл. 2).

Известно, что значительный вклад в уширение спектральных линий атома водорода вносит линейный эффект Штарка [30, 31]. Уширение за счет других механизмов, как правило, является небольшим. Например, доплеровское уширение, рассчитанное по известным формулам [29, 30], при температуре 5000 К составляет 0.017 нм. Им можно пренебречь, т.к. оно существенно меньше штарковского уширения линий H_α и H_β .

Бальмеровская линия H_β является одной из популярных линий при измерениях концентрации электронов n_e [30, 31]. Расчеты выполнялись с использованием простой аппроксимационной зависимости $\Delta\lambda_{1/2} = C \cdot n_e^{2/3}$, где C – коэффициент, зависящий от температуры и концентрации электронов. В диапазоне n_e от 10^{15} до 10^{16} см^{-3} при $T =$

**Рис. 10.** Профиль спектральной линии H_α . $1 - I = 13.7 \text{ А}$; $2 - 19.8 \text{ А}$. $z = 2 \text{ мм}$.**Таблица 2.** Ширина спектральных линий водорода и параметры электронного газа на разных удалениях от катода

$z, \text{ мм}$	2	10	20	30	40
$T_{e \text{ max}}(\text{Cu}), \text{ К}$	5990	5890	5700	5670	5520
$T_{e \text{ max}}(\text{H}), \text{ К}$	–	–	–	5050	5000
$\Delta\lambda_{1/2}(\text{H}_\alpha), \text{ нм}$	0.46	0.35	0.26	0.16	0.15
$\Delta\lambda_{1/2}(\text{H}_\beta), \text{ нм}$	1.96	1.11	0.91	0.59	0.26
$n_e, 10^{16} \text{ см}^{-3}$	3.07	1.31	0.97	0.51	0.15

$= 5000 \text{ К}$ этот коэффициент можно принять равным 2.0×10^{-11} [29]. Полученные результаты приведены в табл. 2. Как видно, числовые значения n_e являются сравнительно высокими. Такие значения n_e наблюдаются в дуговых разрядах атмосферного давления [32, 33].

Тепловые и расходные характеристики. В исследованном диапазоне токов (5–20 А) тепловые потери на катоде Q_c были небольшими и не превышали 300 Вт. Они составили менее 10% подводимой к разряду мощности. Унос массы воды Δm также был небольшим. В варианте (i) его численное значение было в пределах ошибки измерений. В варианте (ii) он стал заметной величиной и при токе 20 А составил $0.05 \pm 0.01 \text{ г/с}$. Не вся эта вода попадала в плазменный столб. Частично она распылялась в виде мельчайших капелек, что было видно при визуальном наблюдении.

Эрозионные характеристики. В варианте (iii), т.е. когда медный катод находился под водой, происходила значительная эрозия его торца. Некоторые результаты изучения этого процесса приведены в табл. 3. В опытах удельная электрическая проводимость воды σ была в пределах 200–225 мк См/см. Поток воды m составил 1.5 г/с.

Тонкий слой воды, покрывающий торец медного катода, препятствует перемещению катодного пятна. По-видимому, катодное пятно удерживается некоторое время в определенной точке. Здесь происходит проплавление материала катода, а также взрывное кипение воды. Далее можно предположить, что водяной пар, расширившись моментально, заставляет перескочить катодное пятно в другую точку, где процессы повторяются заново. Проплавленная медь выбрасывается в водную среду, диспергируется и затвердевает в виде мельчайших частиц. Возможно, что в реальности на поверхности катода происходят более сложные процессы. Как бы там ни было, медный катод подвергается сильной эрозии. Примечательно, что численное значение удельной эрозии γ медного катода по порядку величины является таким же, как в вакуумном импульсном разряде при многократных включениях тока [34].

Таблица 3. Удельная эрозия медного катода

$\langle I \rangle, A$	9	12	15	18
$\gamma, \text{мкг/Кл}$	22.3	20.6	21.6	19.1

В продуктах эрозии под микроскопом в отраженном свете отчетливо просматривались частицы металлической меди. Это свидетельствует о вероятности того, что происходят микровзрывы. Технические возможности микроскопа позволяли наблюдать частицы с размерами в десятки микрометров. Возможно, что присутствуют частицы еще меньших размеров.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поток воды, обтекающий медный катод, вызывает существенные изменения свойств газового разряда. Такие изменения наиболее четко проявляются в двух вариантах нахождения медного катода в водном потоке. Эти варианты различаются расположением рабочего торца катода: 1) ровень с поверхностью воды; 2) под водой. В первом варианте в плазменном столбе вблизи катода формируется зона, которая отличается по электрическим и оптическим свойствам. Напряженность электрического поля в этой зоне увеличивается, а интенсивность излучения резко возрастает. При этом в видимой области спектра преобладает излучение атомов водорода. Можно считать, что под воздействием газового разряда образуется поток пароводяной плазмы, направленный от поверхности воды вертикально вверх.

Особенностью второго варианта является то, что медный катод подвергается значительной эрозии. Интенсивность эрозии практически такая же, как в процессе разрушения медного катода микровзрывами при многократных повторных импульсных разрядах в вакууме. Эрозия сопровождается образованием микрочастиц металлической меди.

Полученные экспериментальные результаты могут быть полезны при разработке плазменной техники для генерирования пароводяной плазмы, а также для синтеза дисперсных частиц меди.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панов В.А., Василяк Л.М., Ветчинин С.П., Печеркин В.Я., Сон Э.Е. // Прикладная физика. 2016. № 1. С. 61.
2. Locke B.R., Thagard S.M. // Plasma Chem. Plasma Process. 2012. V. 32. P. 875. doi: 10.1007/s11090-012-9403-y
3. Шуаибов А.К., Миня А.И., Гомоки З.Т., Козак Я.Ю. // ТВТ. 2014. Т. 52. С. 469. [Shuaibov A.K., Minya A.I., Gomoki Z.T., Kozak Ya.Yu. // High Temperature. 2014. V. 52. P. 453. doi: 10.1134/S0018151X14030250]
4. Ваулин Д.Н., Ершов А.П., Каменщиков С.А., Черников В.А. // ТВТ. 2011. Т. 49. С. 365. [Vaulin D.N., Yerшов A.P., Kamenshchikov S.A., Chernikov V.A. // High Temperature. 2014. V. 49. P. 356. doi: 10.1134/S0018151X11030205]
5. Sun B., Kunitomo S., Igarashi C. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2006. V. 39. P. 3814. doi: 10.1088/0022-3727/39/17/016
6. Шмелев В.М., Анпилов А.М., Бархударов Э.М. // Прикладная физика. 2005. № 5. С. 55.
7. Anpilov A.M., Barkhudarov E.M., Bark Yu.B., Zadira-ka Yu.V., Christofi M., Kozlov Yu.N., Kossyi I.A., Kopyev V.A., Silakov V.P., Taktakishvili M.I., Temchin S.M. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2001. V. 34. P. 993. doi: 10.1088/0022-3727/34/6/322
8. Какауров С.В., Суворов И.Ф., Соловьева Т.Л., Юдин А.С., Рахлецова Т.В. // Изв. вузов. Физика. 2014. Т. 57 (3-3). С. 156.
9. Коликов В.А., Курочкин В.Е., Панина Л.К., Рутберг А.Ф., Рутберг Ф.Г., Снетов В.Н., Стогов А.Ю. // ЖТФ. 2007. Т. 77. № 2. С. 118. [Kolikov V.A., Kurochkin V.E., Panina L.K., Rutberg A.F., Rutberg F.G., Snetov V.N., Stogov A.Yu. // Techn. Phys. 2007. V. 52. P. 263. doi: 10.1134/S1063784207020193]
10. Максимов А.И., Наумова И.К., Хлюстова А.В. // Химия высоких энергий. 2012. Т. 46. С. 259. [Maksimov A.I., Naumova I.K., Khlustova A.V. // High Energy Chemistry. 2012. V. 46. P. 212. doi: 10.1134/S0018143912030058]
11. Максимов А.И., Хлюстова А.В. // Прикл. физика. 2012. № 5. С. 62.
12. Kelgenbaeva Z., Omurzak E., Ihara H., Iwamoto C., Sulaimankulova S., Mashimo T. // Phys. Status Solidi A. 2015. V. 212. P. 2951. doi: 10.1002/pssa.201532502
13. Орлов А.М., Явтушенко И.О., Боднарский Д.С., Уфаркина Н.В. // ЖТФ. 2013. Т. 83. № 9. С. 24. [Orlov A.M., Yavtushenko I.O., Bodnarskii D.S., Ufarkina N.V. // Techn. Phys. 2013. V. 58. P. 1267. doi: 10.1134/S1063784213090211]
14. Бураков В.С., Савастенко Н.А., Тарасенко Н.В., Невар Е.А. // ЖПС. 2008. Т. 75. С. 111. [Burakov V.S., Savastenko N.A., Tarasenko N.V., Nepar E.A. // JAS. 2008. V. 75. P. 114. doi: 10.1007/s10812-008-9003-z]
15. Даниленко Н.Б., Галанов А.И., Корнев Я.И., Балухтин П.В., Шиян Л.Н., Юрмазова Т.А., Яворовский Н.А., Савельев Г.Г. // Нанотехника. 2006. № 8. С. 81.
16. Saito G., Akiyama T. // J. Nanomaterials. 2015. V. 2015. P. 123696. doi: 10.1155/2015/123696
17. Chen Q., Li J., Li Y. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2015. V. 48. P. 42400. doi: 10.1088/0022-3727/48/42/42400
18. Тепанов А.А., Крутяков Ю.А., Лисичкин Г.В. // Российский хим. журн. 2012. Т. LVI (5-6). С. 18. [Tepanov A.A., Krutyakov Yu.A., Lisichkin G.V. // Russian J. General Chem. 2014. V. 84. P. 986. doi: 10.1134/S1070363214050363]
19. Смирнов С.А., Шутов Д.А., Бобкова Е.С., Рыбкин В.В. // Физика плазмы. 2016. Т. 42. С. 81. [Smirnov S.A., Shutov D.A., Bobkova E.S., Rybkin V.V. // Plasma Phys. Rep. 2016. V. 42. P. 74. doi: 10.1134/S1063780X16010141]

20. *Smirnov S.A., Shutov D.A., Bobkova E.S., Rybkin V.V.* // Plasma Chem. Plasma Process. 2015. V. 35. P. 639. . doi 10.1007/s11090-015-9626-9
21. *Shirai N., Nakazawa M., Ibuka S., Ishii S.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2008. V 36. P. 1160. doi 10.1109/TPS.2004.924557
22. *Тазмеев Г.Х., Тимеркаев Б.А., Тазмеев Х.К., Арсланов И.М.* // Прикл. физика. 2016. № 1. С. 72.
23. *Smirnov S.A., Shutov D.A., Bobkova E.S., Rybkin V.V.* // Plasma Chem. Plasma Process. 2016. V. 36. P. 415. doi 10.1007/s11090-015-9669-y
24. *Valiev R.I., Khafizov A.A., Shakirov Yu.I., Sushchikova A.N.* // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2015. V. 86. 012026. doi 10.1088/1757-899X/86/1/012026.10.1088/1757-899X/86/1/012026
25. *Тазмеева Р.Н., Тазмеев Б.Х.* // Прикл. физика. 2014. № 1. С. 35.
26. *Tazmееv Kh.K., Tazmееv A.Kh.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. V. 567. 012035. doi 10.1088/1742-6596/567/1/012035
27. *Titov V.A., Rybkin V.V., Smirnov S.A., Kulentsan A.L., Choi H.-S.* // Plasma Chem. Plasma Process. 2006. V. 26. P. 543. . doi 10.1007/s11090-006-9014-6
28. *Баринов Ю.А., Школьник С.М.* // ЖТФ. 2002. Т. 72. № 3. С. 31. [*Barinov Yu.A., Shkol'nik S.M.* // Technical Physics. 2002. V. 47. P. 313. 10.1134/1.1463120]
29. http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html
30. Plasma Diagnostics / Ed. by *W. Lochte-Holtgreven*. Amsterdam: North-Holland, 1968. [Методы исследования плазмы. Спектроскопия, лазеры, зонды. Под ред. Лохте-Хольтгревена. М.: Мир, 1971]
31. *Очкин В.Н.* Спектроскопия низкотемпературной плазмы. М.: Физматлит, 2006.
32. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. Долгопрудный: Интеллект, 2009. [*Raizer Yu.P.* Gas Discharge Physics. Berlin: Springer, 1991]
33. *Асиновский Э.И., Кириллин А.В., Низовский В.Л.* Стабилизированные электрические дуги и их применение в теплофизическом эксперименте. М.: Физматлит, 2008.
34. *Месяц Г.А.* Эктоны. Ч. 1. Екатеринбург: УИФ Наука, 1993. [*Mesyats G.A.* Explosive Electron Emission. Ekaterinburg: URO-Press, 1998]