

Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

A. F. Gaisin, É. E. Son, Vapor-air discharges between electrolytic cathode and metal anode at atmospheric pressure, *TVT*, 2005, Volume 43, Issue 1, 5–10

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use

<http://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.14.91

March 25, 2025, 21:09:03



## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЫ

УДК 537.525

### ПАРОВОЗДУШНЫЕ РАЗРЯДЫ МЕЖДУ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМ КАТОДОМ И МЕТАЛЛИЧЕСКИМ АНОДОМ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

© 2005 г. А. Ф. Гайсин\*, Э. Е. Сон\*\*

\*Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева

\*\*Московский физико-технический институт (государственный университет)

Поступила в редакцию 10.03.2004 г.

Экспериментально исследованы структуры и электрические характеристики паровоздушных разрядов между металлическим анодом (сплошной, полой, заостренный) и электролитическим катодом при атмосферном давлении. Установлены особенности свободных паровоздушных разрядов с электролитическим катодом и их взаимный переход. Анализ и обобщение экспериментальных результатов позволили выявить основные физические процессы, которые определяют возможный механизм поддержания паровоздушного разряда с электролитическим катодом.

#### ВВЕДЕНИЕ

Паровоздушные разряды между металлическим анодом и электролитическим катодом встречаются в целом ряде практических приложений и имеют важное значение для изучения явлений разрядов физики [1–7]. Паровоздушные разряды с электролитическим катодом при атмосферном давлении имеют стабильную и диффузную структуру. Несмотря на все вышеуказанные достоинства, структура и характеристики паровоздушного разряда данного вида изучены слабо. До сих пор не установлены типы разрядов. Нет также единого мнения о природе такого разряда, не установлен его механизм. Далеко не исчерпаны различные способы получения источников неравновесной плазмы паровоздушного разряда с электролитическим катодом при атмосферном давлении.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Функциональная схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Она состоит из системы электрического питания 1, электрической ванны 2 и измерительной аппаратуры 3. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) паровоздушного разряда с электролитическим катодом измерялись электростатическим вольтметром С-50 класса точности 1 и амперметром Э514 класса точности 0.5. Относительные погрешности измерения напряжения на разряде не превышали 1.5%. Погрешности измерения напряженности поля и падения напряжения в приэлектродных областях с учетом класса точности приборов и ошибок расчета составляли менее 2%. Для каждого набора значений межэлектродного расстояния, состава и концентрации электролита регистрация парамет-

ров паровоздушного разряда проводилась не менее семи раз. Для определения распределения потенциала менялось расстояние между металлическим анодом и электролитическим катодом и фиксировалось изменение напряжения на разряде с расстоянием при постоянной величине тока. Экстраполяция к нулевому расстоянию между металлическим анодом и электролитическим катодом дает катодное падение потенциала. Осредненная плотность тока на электродах определялась как отношение тока разряда к площади катодного или анодного пятна, а площади катодного и анодного пятен – путем измерения диаметров пятен с помощью микроскопа типа СП-52 с погрешностью  $\pm 0.05$  мм.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные исследования паровоздушного разряда между металлическим анодом и электролитическим катодом проведены в диапазонах излучения тока  $I = 20 - 3000$  мА и межэлектродного промежутка  $l = 0.1 - 15$  мм для различ-

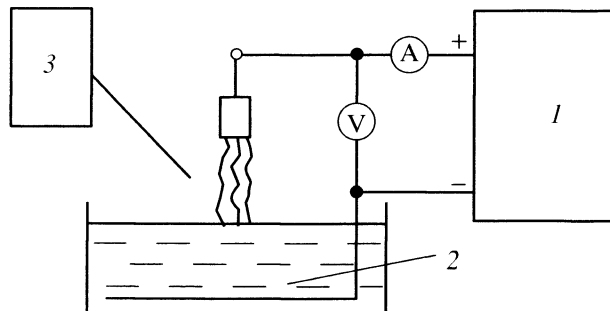


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

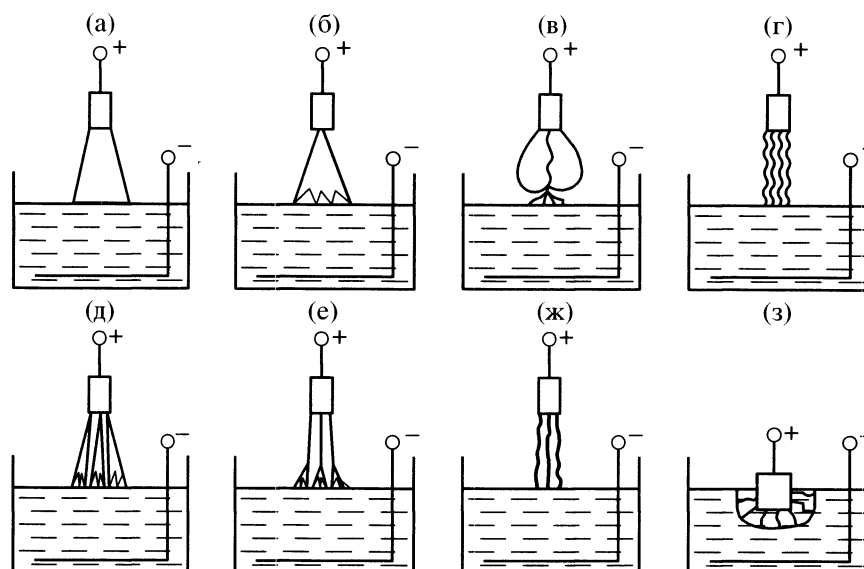


Рис. 2. Типы паровоздушных разрядов.

ного состава (техническая вода, растворы  $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{NaCl}$  в очищенной и технической воде) и концентрации электролита. В экспериментах использовались металлические аноды различной геометрической формы (острие, сплошной, полый) из меди, стали, латуни и чугуна.

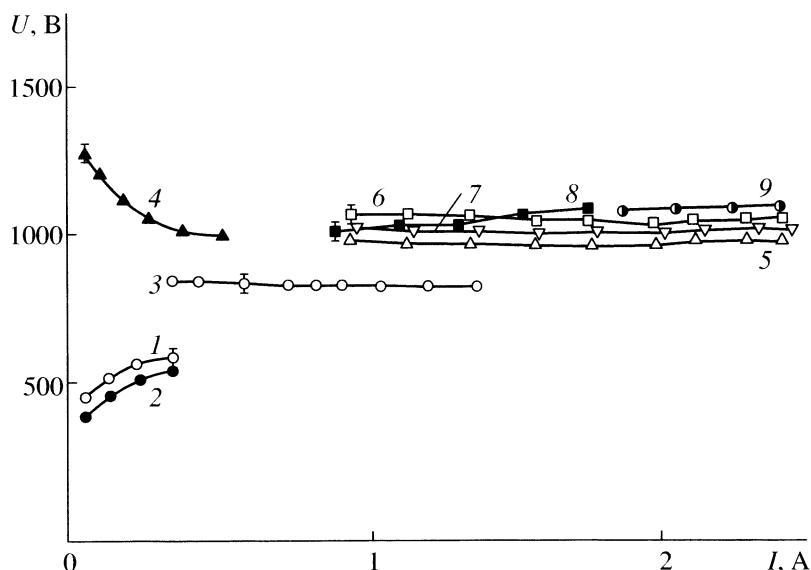
*Формы паровоздушного разряда с электролитическим катодом*

Внешние особенности паровоздушного разряда проявляются в его излучении, геометрической форме, объемной структуре, структуре катодных и анодных пятен. Изучение развития катодных пятен на поверхности электролита показало значительное влияние межэлектродного расстояния, тока разряда, состава и концентрации электролита на структуру катодных пятен. При атмосферном давлении, малых межэлектродных расстояниях ( $l \leq 1$  мм) и небольших токах ( $I = 20 - 300$  мА) наблюдается сплошное пятно на поверхности электролитического катода. С ростом тока разряда или межэлектродного расстояния происходит образование точечных (распределенных) пятен на катоде.

Анализ развития анодных пятен на поверхности металлического анода при различных его геометрических формах выявил, что при атмосферном давлении и малых  $l$  и  $I$  наблюдается сплошное пятно, которое с ростом межэлектродного расстояния или тока переходит в распределенные пятна.

Эти особенности катодных и анодных пятен позволяют получить разные формы паровоздушных разрядов между электролитическим катодом и металлическим анодом. Характер привязки раз-

ряда к аноду зависит от ряда факторов, в том числе и от геометрической формы анода. В случае анода с плоским торцом наблюдаются паровоздушные разряды, представленные на рис. 2. Последовательность рисунков соответствует развитию разряда при повышении тока для различных межэлектродных расстояний. При небольших токах и межэлектродных расстояниях горит тлеющий разряд со сплошными пятнами как на электролитическом катоде, так и на металлическом аноде (рис. 1а). С ростом тока анодное пятно становится контрагированным (рис. 1б). При дальнейшем росте тока и межэлектродного расстояния возникает неустойчивый паровоздушный разряд (рис. 1в). В данном случае наблюдаются точечное пятно на металлическом аноде, распределенные пятна на электролитическом катоде и контрагированный плазменный столб. Вокруг разряда образуется ореол, цвет которого зависит от состава электролита и материала анода. Если не ограничить естественную конвекцию воздуха, то неустойчивый разряд гаснет. При малых  $l$  с повышением  $I$  пятно на аноде становится распределенным (рис. 1г) и разряд занимает значительную часть межэлектродного пространства. С дальнейшим ростом тока объем разряда увеличивается и анодное пятно полностью покрывает торцевую поверхность анода. В этом случае разрядная область имеет устойчивую геометрическую форму, которая состоит из микроразрядов цилиндрической формы. Многоканальный разряд, состоящий из микроразрядов, наиболее полно соответствует понятию "объемный разряд". С ростом тока катодное пятно увеличивается и в случае многоканального разряда его диаметр становится больше диаметра металлического анода. При дальнейшем росте тока увеличение катодного пятна пре-

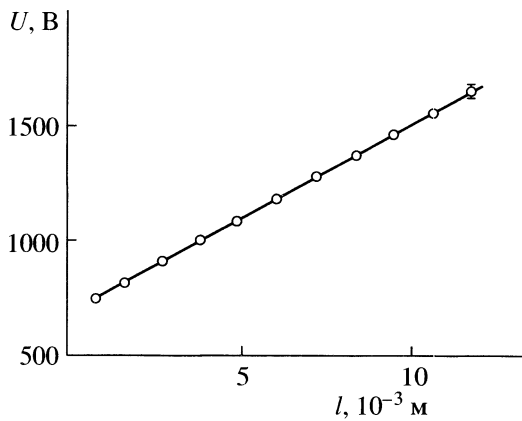


**Рис. 3.** ВАХ паровоздушного разряда между электролитическим катодом (техническая вода, 5%-ный раствор  $\text{CuSO}_4$  в очищенной воде) и металлическим анодом для различных межэлектродных расстояний и диаметров анода: 1 –  $l = 1$  мм,  $d = 3$  мм (медный стержень); 2 –  $l = 0.3$  мм,  $d = 2$  мм (стальная трубка); 3 –  $l = 3$  мм,  $d = 20$  мм (медный стержень); 4 –  $l = 5$  мм,  $d = 5$  мм (медный стержень); 5 –  $l = 5$  мм,  $d = 30$  мм (медный стержень); 6 –  $l = 5$  мм,  $d = 38$  мм (медный стержень); 7 –  $l = 5$  мм,  $d = 30$  мм (стальной стержень); 8 –  $l = 5$  мм,  $d = 18$  мм (латунный стержень); 9 –  $l = 5$  мм,  $d = 65$  мм (чугунный стержень).

кращается и одновременно меняется структура разряда (рис. 1д). В отличие от четвертого типа разряда появляются конусообразные каналы. При еще большем увеличении тока со стороны анода возникает контрагированный плазменный столб, который вблизи катода переходит в конусообразный канал с распределенными пятнами на катоде (рис. 1е). С ростом межэлектродного расстояния при больших токах наблюдается ярко-белое свечение микроразрядов (рис. 1ж). Их длина и количество зависят от величины тока. С ростом тока число микроразрядов увеличивается. Они непрерывно изменяются по длине и хаотично перемещаются внутри разрядной области. При больших токах и значительных концентрациях электролита микроразряды достигают поверхности электролитического катода и контрагируют (рис. 1ж). Появление контрагированных каналов сопровождается изменением характера издаваемого разрядом шума и резким увеличением амплитуды колебаний тока и напряжения. Шум паровоздушного разряда становится подобным треску искрового разряда. Одновременно могут наблюдаться комбинированные формы разряда. Анализ экспериментальных данных показал, что с ростом тока, изменением концентрации и состава электролита (рис. 1г–1ж) разряд наблюдается также в парогазовой оболочке вокруг анода, помещенного внутри электролита (рис. 1з).

*Электрические характеристики*

Наиболее важным интегральным свойством разряда является его вольт-амперная характеристика. Как видно из рис. 3, ВАХ паровоздушного разряда зависят от межэлектродного расстояния и диаметра анода. При диаметре анода 2 или 3 мм и малых межэлектродных расстояниях ВАХ имеют возрастающий характер (кривые 1, 2). Одной из возможных причин такой зависимости является то, что между электролитическим катодом и металлическим анодом горит аномальный тлеющий разряд со сплошными пятнами на электродах. В случае тлеющего разряда с контрагированным пятном на металлическом аноде (кривая 4) напряжение на разряде с ростом тока значительно уменьшается, а напряжение многоканального разряда меняется слабо (кривые 3, 5–9 на рис. 3). Это объясняется тем, что с ростом тока число микроразрядов увеличивается. Из анализа кривых 3, 5–9 следует, что с увеличением диаметра анода от 5 до 65 мм удается получить многоканальный разряд при больших токах. Выявлено, что при больших токах диаметры микроразрядов увеличиваются, а напряжение на разряде уменьшается, что позволяет пропускать через многоканальный разряд большие токи. Микроразряды опираются на микровыступы поверхности металлического анода. В случае использования плоского кремниевого полупроводника в качестве твердого анода было обнаружено множество выгоревших пятен. Напряжение на плазменном столбе многоканального разряда меняется линейно в зависимости от  $l$

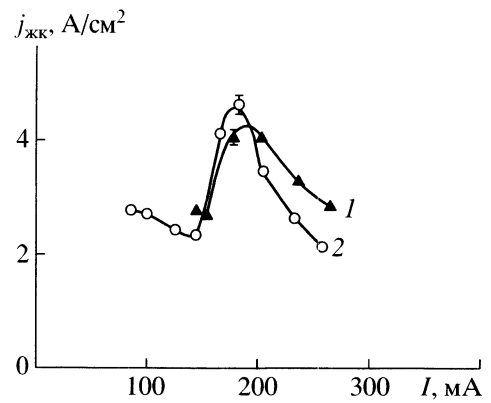


**Рис. 4.** Зависимость напряжения разряда между электролитическим катодом (техническая вода) и медным анодом ( $d = 38 \text{ мм}$ ) от межэлектродного расстояния при атмосферном давлении и  $I = 2 \text{ А}$ .

(рис. 4). Эта зависимость описывает распределение потенциала в положительном столбе (ПС) многоканального разряда между технической водой и медным анодом. По наклону этого графика можно определить напряженность электрического поля в плазменном столбе, а его экстраполяция к нулевому межэлектродному расстоянию дает суммарное значение катодного и анодного падений потенциала. В данном случае напряженность поля в ПС многоканального разряда составляет  $\sim 80 \text{ В/мм}$ . Такое же значение напряженности поля в плазменном столбе паровоздушного разряда получено в [2] зондовым методом.

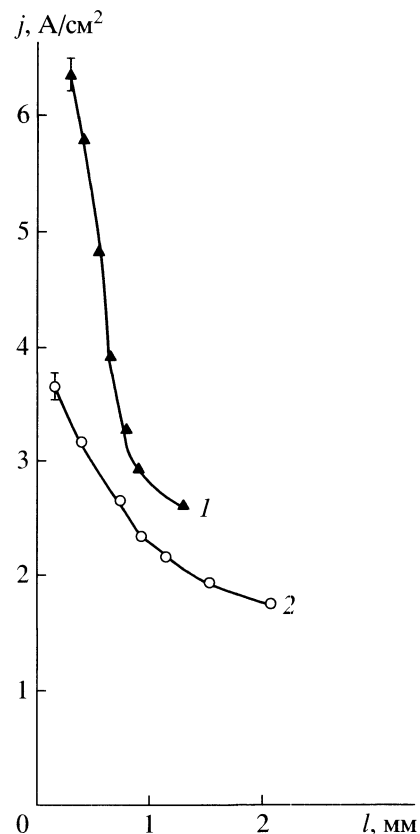
Важнейшими параметрами паровоздушного разряда являются плотности тока на электролитическом катоде и металлическом аноде. Плотность тока на электролитическом катоде при атмосферном давлении и малых межэлектродных расстояниях существенно зависит от состава, концентрации электролита и межэлектродного расстояния. Из рис. 5 видно, что зависимость плотности тока на электролитическом катоде от тока разряда имеет немонотонный характер. В интервале тока разряда от 90 до 140 мА величина  $j_{\text{жк}}$  меняется слабо, а с ростом  $I$  от 140 до 180 мА резко возрастает. Это объясняется особенностями расширения катодного пятна на электролите с ростом тока разряда.

При увеличении межэлектродного расстояния плотность тока на электролитическом катоде значительно уменьшается (рис. 6). Видно, что плотность тока на электролитическом катоде зависит также от геометрической формы металлического анода. Экспериментальные исследования плотности тока на аноде показали, что в случае заостренного медного анода величина  $j_A$  с ростом  $l$  сначала возрастает и достигает максимума, а затем уменьшается. Описанный характер зависимости  $j_A$  от  $l$  не наблюдается для сплошного медного



**Рис. 5.** Зависимость плотности тока на электролитическом катоде (0.68%-ный раствор  $\text{CuSO}_4$  в технической воде) от тока разряда при  $P = 10^5 \text{ Па}$  и  $d = 3 \text{ мм}$  (анод–медный стержень) для межэлектродных расстояний: 1 – 1 мм, 2 – 0.4 мм.

анода. В данном случае  $j_A$  не зависит от межэлектродного расстояния. Установлено, что плотность тока на металлическом аноде при малых  $l$  в три раза превышает плотность тока на электролитическом катоде. Анализ экспериментальных данных показал, что при атмосферном давлении



**Рис. 6.** Зависимость плотности тока на электролитическом катоде (0.68%-ный раствор  $\text{CuSO}_4$  в технической воде) от межэлектродного расстояния при атмосферном давлении,  $I = 80 \text{ мА}$  и  $d = 3 \text{ мм}$ : 1 – заостренный медный анод; 2 – анод–медный стержень.

и малых межэлектродных расстояниях геометрическая форма, материал и состояние металлического анода влияют на электрические характеристики паровоздушного разряда с электролитическим катодом.

Обнаружено неоднородное распределение потенциала и напряженности электрического поля. Как видно из рис. 7, напряженность электрического поля при переходе от металлического анода к электролитическому катоду вначале снижается, принимает минимальное значение, а затем вблизи катода возрастает. Минимальное значение напряженности поля равно 50 В/мм. Катодное и анодное падения соответственно составляют  $U_k \approx 500-650$  В и  $U_a \approx 200$  В. Характер распределения потенциала и напряженности электрического поля, величины катодного и анодного падения потенциала в разряде между электролитическим катодом и металлическим анодом при атмосферном давлении и небольших межэлектродных расстояниях отличаются от характера распределения этих величин в разряде между металлическими электродами [8].

### ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ САМОПОДДЕРЖАНИЯ РАЗРЯДА С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ КАТОДОМ

Механизм электрических разрядов в газе между металлическими электродами достаточно изучен [8–16].

В электролитическом катоде нет свободных электронов, а динамика образовавшихся электронов совершенно иная, чем в металлах. Электроны в равновесном состоянии в водных растворах существуют только в связанном виде как валентные электроны в молекулах воды и в растворенных ионах. Характерные температуры термоэмиссионного перехода через границу электролитического катода превышают 2000 К, что делает практически невозможным этот механизм образования свободных электронов в водных растворах (критическая температура воды  $T = 650$  К). Автоэлектронная эмиссия также маловероятна вследствие относительно небольших напряженностей поля у катода [17]. Металлический электрод для подвода потенциала находится на большом расстоянии от границы разряд-раствор. Поэтому полностью исключена возможность поддержания разряда за счет электронной эмиссии из металлического электрода.

Зависимости диаметра катодного пятна от тока разряда с распределенными пятнами на катоде и точечным пятном на медном аноде при атмосферном давлении для технической воды и однопроцентного раствора NaCl в очищенной воде представлены на рис. 8 (кривые 1 и 2 соответственно). В случае использования технической воды приведенная зависимость имеет особенности.

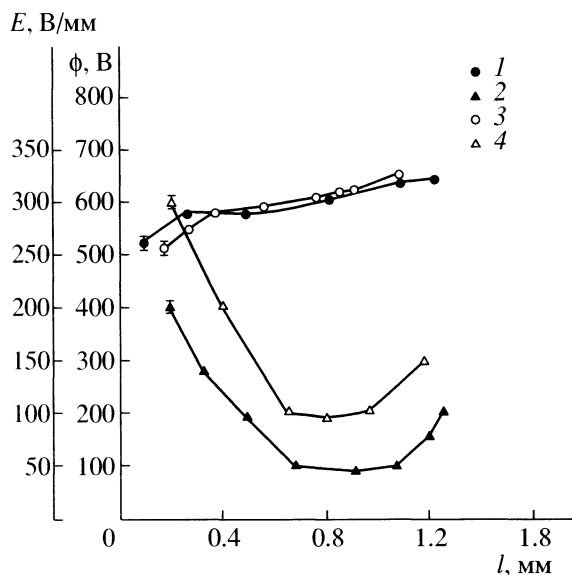


Рис. 7. Распределение потенциала (1, 3) и напряженности электрического поля (2, 4) в тлеющем разряде с электролитическим катодом при атмосферном давлении и  $I = 70$  мА: 1, 2 — сплошной медный анод,  $d = 3$  мм, катод — 1%  $\text{CuSO}_4$  в очищенной воде; 3, 4 — пористый медный анод,  $d = 3$  мм, катод — 0.6%  $\text{CuSO}_4$  в технической воде. Расстояние отсчитывается от электролитического катода.

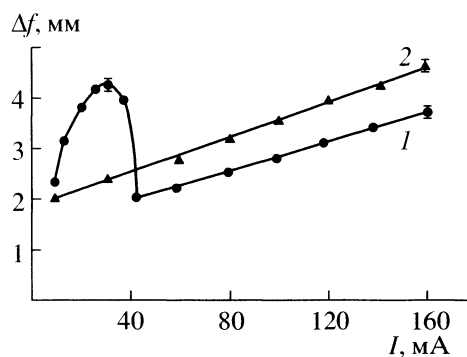


Рис. 8. Зависимость диаметра катодного пятна от тока разряда. Точечное пятно на медном аноде цилиндрической формы,  $d = 5$  мм: 1 — катод — техническая вода, 2 — катод — однопроцентный раствор NaCl в очищенной воде.

В интервале токов 10–40 мА диаметр катодного пятна быстро увеличивается, а затем резко уменьшается. С дальнейшим ростом тока разряда зависимость диаметра катодного пятна от тока имеет линейный характер, как и в случае однопроцентного раствора NaCl при малых токах. Для поддержания разряда в технической воде необходимо увеличить диаметр катодного пятна. Для очищенной воды диаметр катодного пятна существенно возрастает. С ростом тока начинается интенсивное испарение электролита. В прикатодную область разряда из-за интенсивного теплообмена попадают примеси, способствующие поддержанию

разряда. Поэтому с ростом электропроводности диаметр катодного пятна уменьшается. В случае использования электролитического катода в виде раствора NaCl вследствие испарения электролита в прикатодную область разряда попадают пары натрия. При этом нижняя часть столба со стороны катода имеет желтый цвет, характерный для паров натрия. Спектральные исследования [4] также показали, что в прикатодной области наблюдаются линии натрия. При катодном падении потенциала 400–900 В положительный ион  $H^+$ , ускоряясь в направлении к катоду, имеет энергию 400–900 эВ. При соударении с нейтральной частицей или ионом в электролитическом катоде ион  $H^+$  передает связанному в молекуле или ионе электрону энергию  $\epsilon_e = 0.4\text{--}0.98$  эВ, что существенно меньше потенциала ионизации молекул воды, но близко к энергии связи электрона в отрицательном ионе примеси. В результате происходят отрыв электрона от отрицательного иона вблизи поверхности электролитического катода и переход в газовую фазу. При этом наблюдается слабая эмиссия электрона из электролитического катода. В [18] оценка с использованием простейшего выражения коэффициента эмиссии электронов  $\gamma$  из электролита для нормального катодного падения потенциала дает значения от  $10^{-5}$  до  $10^{-3}$ , что на 2–3 порядка меньше, чем коэффициенты эмиссии электронов из металлического катода. Это подтверждают также экспериментальные исследования паровоздушного разряда с электролитическим катодом, выполненные в данной работе.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предполагаемый механизм поддержания паровоздушного разряда между металлическим анодом и электролитическим катодом связан со следующими основными физическими процессами: передачей из плазмы паровоздушного разряда кинетической энергии направленного движения положительных ионов и хаотического движения нейтральных частиц; отрывом электрона от отрицательного иона при соударениях с положительными ионами; переходом в разряд из прикатодного слоя электролита примесей в результате процессов интенсивного теплообмена; рекомбинацией атомов водорода и гидроксильных радикалов на поверхности электродов; перераспределением плотности тока на поверхности электролитического катода и образованием распределенных пятен.

Вышеприведенные результаты согласуются с известными экспериментальными фактами (например, [17–20]) и объясняют их. На основе анализа и обобщения экспериментальных данных определен возможный механизм поддержания паровоздушного разряда между электролитическим катодом и металлическим анодом.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энциклопедия низкотемпературной плазмы/Под ред. Фортова В.Е. М.: Наука, 2000. С. 241.
2. Гайсин Ф.М., Сон Э.Е. Электрофизические процессы в разрядах с твердым и жидким электродами. Свердловск: Изд-во Уральского ун-та, 1989. 432 с.
3. Гайсин Ф.М., Сон Э.Е. Возникновение и развитие объемного разряда между твердыми и жидкими электродами // Химия плазмы. 1990. Т. 16. С. 120.
4. Гайсин Ф.М., Сон Э.Е., Шакиров Ю.И. Объемный разряд в парогазовой среде между твердыми и жидкими электродами. М.: Изд-во ВЗПИ, 1990. С. 90.
5. Afanas'yeva N.A., Galimova R.K., Gaisin F.M. et al. The SInteraction of the Stream-gas Discharge Plasma with the Surfaces of Solid and Liquid Substances // TPP-55 Fifth European Conf. on thermal plasma processes. Paris, 1998. P. 265.
6. Gaisin F.M., Gaisin A.F. On Plasma Treatment of the Metal Products Surface by the Stream and Gaseous Discharge on Untraditional Electrodes // 6th Japan Intern. Sampe Symposium Exhibition "A New Perspective in Advancement of Materials". Tokyo: Big Sight Tokyo, 1999. P. 315.
7. Son E.E., Gaisin F.M., Zibarov A.V. Plasms Technologies and Their Computer Simulations // Intern. Conf. on Plasma Science (ICOPS). Jeju, Korea. 2003. № 2A04. P. 183.
8. Райзер Ю.П. Основы современной физики газоразрядных процессов. М.: Наука, 1980. 416 с.
9. Энгель А., Штеенбек М. Физика и техника электрического разряда в газах / Под ред. Капцова Н.А. М.: ОНТИ, 1936.
10. Леб Л. Основные процессы разрядов в газах / Под ред. Капцова Н.А. М.: Гостехиздат, 1950. 672 с.
11. Капцов Н.А. Электрические явления в газах и вакууме. М.: Гостехиздат, 1950. 836 с.
12. Капцов Н.А. Электроника. М.: Гостехиздат, 1956. 459 с.
13. Энгель А. Ионизованный газ. М.: Физматгиз, 1959. 332 с.
14. Мик Дж., Крэгс Дж. Электрический пробой в газах. М.: ИЛ, 1960. 601 с.
15. Смирнов Б.М. Физика слабоионизованного газа. М.: Наука, 1972.
16. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 591 с.
17. Hickling A. Modern Aspects of Electrochemistry. London: Butterworth, 1971. № 6. P. 329.
18. Хлюстова А.В., Максимов А.И., Тутов В.А. Коэффициенты эмиссии электронов из растворов электролита. Мат. школы № 9 плазмохимии для молодых ученых России. Иваново: ИГХТУ, 1999. С. 132.
19. Плазмохимия 90 / Под ред. Полока Н.С. М.: ИНХС АН СССР, 1990. 337 с.
20. Словецкий Д.Ч., Терентьев С.Д., Плеханов В.Г. Механизм плазменно-электролитического нагрева металлов // ТВТ. 1986. Т. 24. № 2. С. 353.