

УДК 537.523.9

## Исследование газового разряда с жидким электролитным катодом вблизи его критических тепловых режимов

Г. Х. Тазмеев, Б. А. Тимеркаев, Х. К. Тазмеев, И. М. Арсланов

*Экспериментально исследован газовый разряд атмосферного давления между жидким электролитным катодом и металлическим анодом в диапазоне токов 1—10 А. Рассмотрены тепловые режимы катода, в которых температура электролита близка к температуре кипения. Показано, что в таких критических режимах тепловые потери на катоде практически полностью формируются за счет джоулевого тепловыделения внутри электролита. Проанализированы условия минимизации тепловых потерь на жидком электролитном катоде.*

PACS: 52.80.-s

*Ключевые слова:* газовый разряд, жидкий электрод, электролитный катод, электролиз контактный с тлеющим разрядом, массовый унос электролита.

### Введение

В последнее время возрос интерес к газовым разрядам, возбуждаемым между жидким электролитом и твердотельным электродом. Они перспективны для обеззараживания воды [1—4], обработки текстильных материалов в водной среде [5], модификации поверхности металлов [6], получения оксидных порошков [7] и синтеза наночастиц [8—10]. В сильноточном режиме такие разряды могут быть использованы в качестве источника энергоносителя в плазмохимических технологиях переработки отходов [11].

В связи с перспективностью использования газовых разрядов с жидким электролитным катодом в энергоемких технологических процессах практическую значимость приобретают исследования их энергетических характеристик, в первую очередь, тепловых характеристик электролитного катода, например, таких как тепловые потери на катоде и джоулево тепловыделение внутри электролита. Немаловажно также выявление зако-

номерностей массового уноса электролита под воздействием газового разряда. Эти вопросы частично рассмотрены в работах [12—15]. Так, в работе [15] установлено, что в формировании энергетических характеристик разряда существенную роль играет поток электролита, протекающего через катод. Варьированием данного параметра в сторону уменьшения достигнуто значительное снижение тепловых потерь на электролитном катоде. Однако чем слабее поток электролита, тем выше становится его температура. Критическая ситуация возникает при вскипании электролита. Наблюдаются два варианта завершения такой ситуации. В первом варианте разряд гаснет, не вызывая никаких последствий. Во втором варианте происходит скачкообразное повышение тока, и образуются такие последствия, какие бывают в случае возникновения короткого замыкания в цепи электрического питания. При таких обстоятельствах получение и исследование газового разряда крайне затруднительно. Тем не менее, критические параметры важны для практики. В связи с этим целью данной работы явилось исследование энергетических характеристик газового разряда в условиях, наиболее близких к критическим.

### Эксперимент

На рис. 1 схематично изображен катодный узел газоразрядного устройства. Основные элементы его конструкции: стержень 1, корпус 2 и выходной патрубок 3. Стержень 1 является медным. Его диаметр 10 мм, радиус закругления 5 мм. Корпус 2 и выходной патрубок 3 изготовлены из диэлектрического материала. Выходной патрубок 3 выполнен съемным. В экспериментах были использованы патрубки с тремя различными диамет-

Тазмеев Гаяз Харисович, аспирант<sup>1</sup>.

Тимеркаев Борис Ахунович, профессор<sup>1</sup>.

Тазмеев Харис Каюмович, доцент<sup>2</sup>.

Арсланов Ильяс Миргарифович, старший преподаватель<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Казанский национальный исследовательский технический университет.

Россия, 420111, г. Казань, ул. Карла Маркса, 10.

Тел. (843) 231-02-24.

<sup>2</sup> Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета.

Россия, 423812, г. Набережные Челны, просп. Сююмбике, 10А.

Тел. (8552) 39-59-72. Факс (8552) 39-59-72.

E-mail: tazmeevh@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15 декабря 2015 г.

© Тазмеев Г. Х., Тимеркаев Б. А., Тазмеев Х. К., Арсланов И. М., 2016

рами: 12,7; 20,0 и 28,0 мм. Толщина стенки составляла 2 мм.

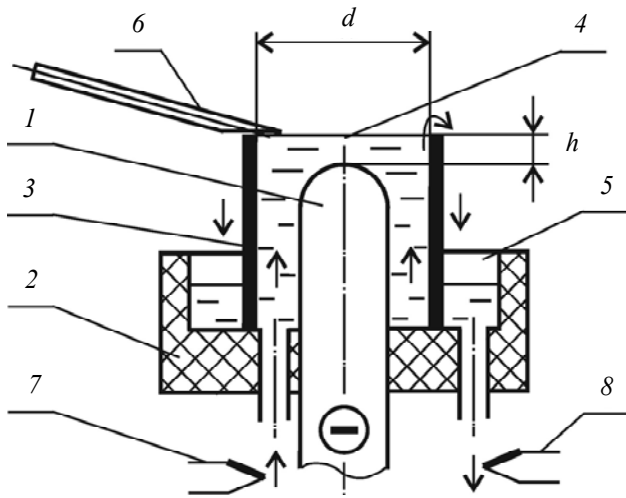


Рис. 1. Катодный узел.

Электролит 4 подавался вовнутрь выходного патрубка 3. Он переливался через края патрубка 3 в канавку 5 и оттуда сливался в систему охлаждения. Глубина  $h$  погружения медного стержня 1 в электролит 4 варьировалась перемещением его по вертикали.

Для измерения падения напряжения внутри электролита  $\Delta U_k$  использовался электрический зонд 6. Он представлял собой вольфрамовую проволоку с диаметром 0,15 мм, вставленную в трубку из кварцевого стекла. В опытах рабочий торец зонда устанавливался на краю патрубка 3 так, как показано на рис. 1. Мощность джоулевого тепловыделения внутри электролита вычислялась по формуле:

$$Q_j = I \cdot \Delta U_k,$$

где  $I$  — разрядный ток.

Тепловые потери на катоде определялись калориметрическим способом

$$Q_k = m_{\text{вых}} \cdot c \cdot \Delta t.$$

Здесь  $m_{\text{вых}}$  — поток электролита через катодный узел;  $c$  — теплоемкость электролита (принималась равной теплоемкости воды);  $\Delta t$  — разность показаний хромель-алюмелевых термопар, установленных на входе в катодный узел 7 и на выходе из него 8.

Поток электролита определялся как отношение количества электролита, вытекшего из катодного узла, к промежутку времени, в течение которого электролит вытекал. Измерения потока электролита производились до зажигания газового разряда ( $m_{\text{вх}}$ ) и во время его горения ( $m_{\text{вых}}$ ). Разница потоков принималась как массовый унос элек-

тролита  $G$ , происходящий под воздействием газового разряда:

$$G = m_{\text{вх}} - m_{\text{вых}}. \quad (1)$$

В качестве электролита использовался слабokonцентрированный раствор хлорида натрия в дистиллированной воде. Удельная электрическая проводимость  $\sigma$  электролита измерялась кондуктометром АНИОН 4150. Был приготовлен раствор с  $\sigma = 10,00$  мСм/см. Известно, что электролизные процессы и воздействие со стороны газоразрядной плазмы вызывают изменение электрических свойств электролита. Поэтому после каждой небольшой серии опытов производилась корректировка величины  $\sigma$ . Отклонения от первоначального значения не превышали  $\pm 0,20$  мСм/см.

Ток измерялся стрелочным многопредельным прибором типа М 2015 класса точности 0,2. Использовался источник питания на базе инверторного преобразователя. Выбор был обусловлен тем, что источники питания такого типа имеют надежную защиту от короткого замыкания и обеспечивают устойчивое горение газового разряда в любой точке вольт-амперной характеристики. При этом ошибки стабилизации тока не превышают 1 %.

### Результаты экспериментов и их анализ

Результаты эксперимента, проведенного при следующих условиях: температура электролита на входе в катодный узел  $t_{\text{вх}} = 12 \pm 1$  °С, поток электролита  $m_{\text{вх}} = 6,3 \pm 0,1$  г/с, диаметр выходного патрубка  $d = 28,0$  мм, представлены на рис. 2. Графики вверху рисунка показывают, как меняются тепловые потери на катоде  $Q_k$  и мощность джоулевого тепловыделения  $Q_j$  внутри электролита при постоянном потоке электролита ( $m_{\text{вх}} = \text{const}$ ). Внизу рисунка приведены отдельные видеокadres процесса. Анализируя приведенные данные, можно утверждать, что с ростом тока интенсивность процессов тепломассообмена между электролитным катодом и газоразрядной плазмой усиливается. В связи с этим растут тепловые потери на катоде. Часть тепловых потерь составляет джоулево тепло, выделяемое внутри электролита. Как видно, оно тоже растет и при больших токах его рост усиливается. Согласно закону Джоуля-Ленца, такой характер изменения  $Q_j$  является вполне закономерным и ожидаемым.

Таким образом, с увеличением тока тепловыделение внутри электролита возрастает. При этом, естественно, температура электролита повышается, и она достигает температуры кипения. Вскипание электролита резко меняет условия в прикатодной зоне газового разряда. Нарушается его пространственная структура. До критической

ситуации привязка разряда к катоду является распределенной (рис. 2, кадры 1, 2), а в критическом тепловом режиме она становится контрагированной (рис. 2, кадры 3, 4). При токах меньше критического  $I^*$  в прикатодной зоне преобладают при-

знаки тлеющего разряда, внешним проявлением которых является объемное горение. В критической ситуации появляются признаки дугового разряда. Одним из них является появление ярко светящегося узкого токового канала.

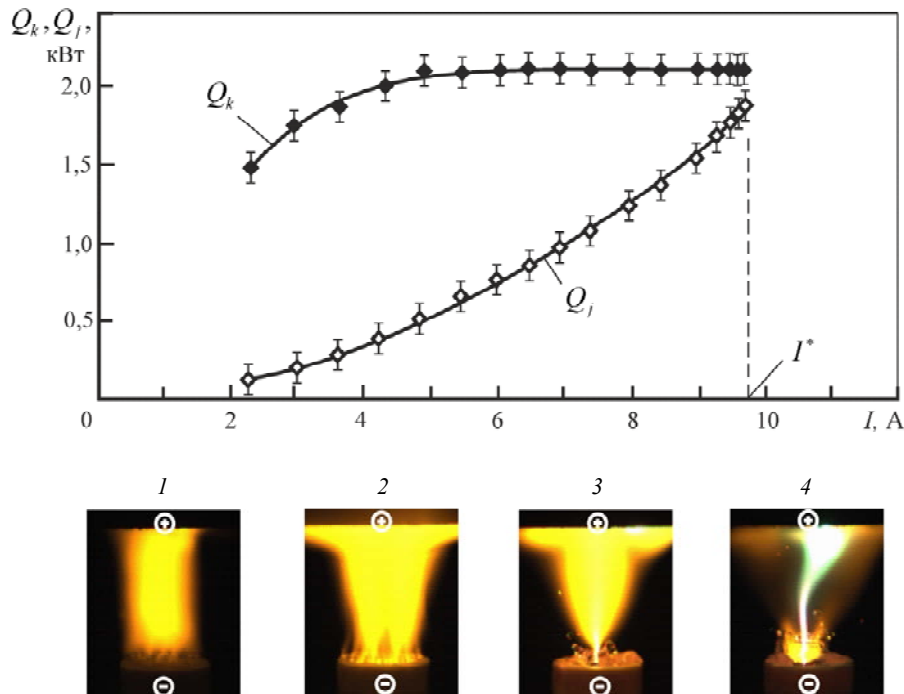


Рис. 2. Возникновение критического теплового режима и его характеристики. Вверху — графики зависимостей тепловых потерь на катоде  $Q_k$  и мощности джоулевого тепловыделения внутри электролита  $Q_j$  от разрядного тока.  $I^*$  — ток при критическом тепловом режиме. Внизу видеокадры 1—4 (экспозиция 200 мкс),  $I < I^*$  в видеокадрах 1, 2 (соответственно 3 и 9,5 А).  $I > I^*$  в видеокадрах 3 и 4.

Опыты показали, что признаки электрической дуги можно наблюдать только в тех случаях, когда медный стержень погружен в электролит на небольшую глубину. В частности, при  $I^* = 9$  А потребовалось погружение на глубину не более 4 мм.

Горение в режиме контрагирования токового канала сопровождается разбрызгиванием электролита. По всей вероятности, разряд замыкается на медный стержень. При большей глубине погружения медного стержня, видимо, происходит обжатие токового канала жидким электролитом и его схлопывание. Следует ожидать, что при повышенных токах разряд не погаснет и медный стержень можно будет погрузить в электролит еще глубже.

Графики зависимостей  $Q_k$  и  $Q_j$  от тока практически сходятся при  $I^*$ . Следовательно, в критическом режиме тепловые потери на катоде и мощность джоулевого тепловыделения внутри электролита можно считать численно равными, т. е. справедливо соотношение:

$$m_{\text{вых}}^* \cdot c \cdot \Delta t \approx I^* \cdot \Delta U_k. \quad (2)$$

Используя равенство (2), можно определить минимальный поток электролита, который необходим для обеспечения устойчивого горения газового разряда:

$$m_{\text{вых}}^* \approx \frac{(I^*)^2 \cdot R_k}{c \cdot \Delta t}. \quad (3)$$

Здесь  $R_k$  — омическое сопротивление катодного узла. Численное значение теплоемкости  $c$  для электролита можно принять таким же, как и для воды, т. е. равной 4,19 кДж/(кг·К), а  $\Delta t$  определить как разность  $100 - t_{\text{вх}}$ , где  $t_{\text{вх}}$  — температура электролита на входе в катодный узел.

Из формулы (3) следует, что поток электролита, требуемый для работы вблизи критических тепловых режимов, а вместе с ним и тепловые потери на катоде можно свести к минимуму, приняв меры для уменьшения  $R_k$ .

На рис. 3 представлены диаграммы, построенные по результатам экспериментов. Параболическая форма кривых свидетельствует о правомерности предположений, на основе которых получена формула (3). На этом же рисунке приве-

дены результаты вычислений массового уноса электролита по формуле (1) для критических режимов. Как видно, массовый унос электролита увеличивается практически пропорционально току. Такую закономерность можно считать характерным свойством газового разряда с жидким электролитным катодом, поскольку оно проявляется и в других условиях экспериментов [12—15]. Коэффициент пропорциональности  $k$  варьируется в небольших пределах в зависимости от свойств электролита и условий его охлаждения. В данной работе можно принять  $k = 0,09 \cdot 10^{-3}$  кг/(с·А).

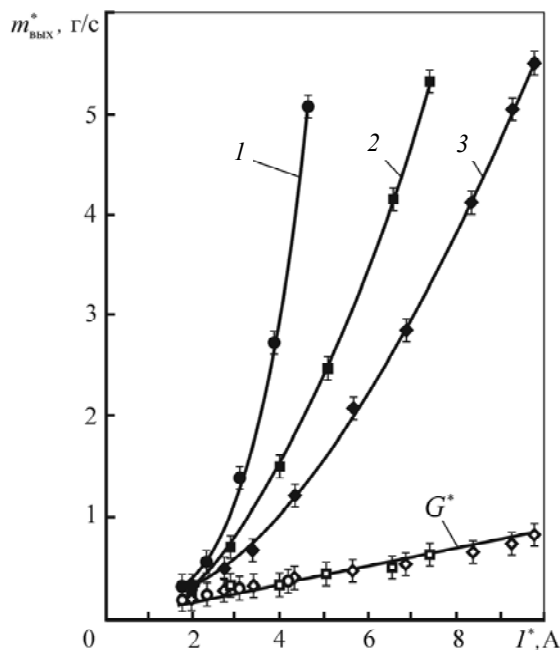


Рис. 3. Диаграммы критического теплового режима:  $m_{\text{вых}}^*$  — массовый поток электролита через катодный узел;  $G^*$  — массовый унос электролита. Диаметр выходного патрубка катодного узла  $d$ : 1 — 12,7 мм; 2 — 20,0; 3 — 28,0.

Таким образом, с учетом массового уноса расчетное значение потока электролита на входе в катодный узел может быть определено по формуле:

$$m_{\text{вх}}^* \approx \frac{(I^*)^2 \cdot R_k}{c \cdot \Delta t} + k \cdot I^* \quad (4)$$

Формула (4) может быть использована для определения минимального потока электролита через катодный узел на этапе проектирования газоразрядных устройств.

### Заключение

Проведено экспериментальное исследование газового разряда с жидким электролитным катодом. Рассмотрены тепловые режимы катода, в которых температура электролита близка к температуре кипения. Показано, что в таких режимах тепловые потери на катоде практически полностью формируются за счет джоулевого тепловыделения внутри электролита.

Из полученных результатов следует, что для минимизации тепловых потерь на жидком электролитном катоде необходимо принять меры, способствующие уменьшению омического сопротивления слоя электролита над токоподводящим электродом.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Bobkova E. S., Rybkin V. V. // Plasma Chem. Plasma Process. 2015. Vol. 35. No. 1. P. 133.
2. Баринов Ю. А., Кузикова И. Л., Зиновьева С. В., Школьник С. М., Медведева Н. Г. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. Вып. 17. С. 68.
3. Jiang B., Zheng J., Qiu S., Wu M., Zhang Q., Yan Z., Xue Q. // Chem. Eng. J. 2014. Vol. 236. P. 348.
4. Максимов А. И., Хлюстова А. В. // Прикладная физика. 2012. № 5. С. 62.
5. Титова Ю. В., Стокозенко В. Г., Неманова Ю. В., Максимов А. И. // ХВЭ. 2012. Т. 46. № 5. С. 412.
6. Kashapov L. N., Kashapov N. F., Kashapov R. N. // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. Vol. 567. P. 012025.
7. Valiev R. A., Shakirov Yu. I., Pliuchin A. N. // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. Vol. 567. P. 012040.
8. Saito G., Akiyama T. // Journal of Nanomaterials. 2015. Vol. 2015. No. 123696.
9. Бураков В. С., Невар Е. А., Неделько М. И., Тарасенко Н. В. // Российский химический журнал. 2013. Т. 57. № 3–4. С. 17.
10. Kareem T. A., Kaliani A. A. // Ionics. 2012. Vol. 18. No. 3. P. 315.
11. Тазмеев А. Х., Фридланд С. В., Мифтахов М. Н. // Вестник Казанского Технологического Университета. 2006. № 6. С. 43.
12. Tazmееv Kh. K., Tazmееv A. Kh. // Heat Transfer Research. 2005. Vol. 36. No. 8. P. 623.
13. Мифтахов М. Н., Тазмеев Х. К., Тазмеев А. Х., Фридланд С. В. // ИФЖ. 2006. Т. 79. № 3. С. 109.
14. Тазмеева Р. Н., Тазмеев Б. Х. // Прикладная физика. 2014. № 1. С. 35.
15. Tazmееv Kh. K., Arslanov I. M., Tazmееv G. Kh. // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. Vol. 567. P. 012001.

## A study of a gas discharge with a liquid electrolyte cathode near its critical thermal modes

G. Kh. Tazmeev<sup>1</sup>, B. A. Timerkaev<sup>1</sup>, Kh. K. Tazmeev<sup>2</sup>, and I. M. Arslanov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> A. N. Tupolev Kazan National Research Technical University  
10 K. Marx str., Kazan, 420111, Russia

<sup>2</sup> Branch of Kazan Federal University in Naberezhnye Chelny  
10A, Sujumbike av., Naberezhnye Chelny, 423812, Russia  
E-mail: tazmeevh@mail.ru

Received December 15, 2015

*A gas discharge between the liquid electrolyte cathode and a metal anode at currents experimentally has been studied at the atmospheric pressure in the range of 1–10 A. Consideration was given to the thermal conditions of the cathode, wherein the electrolyte temperature is close to the boiling point. It is shown that such critical modes of heat losses at the cathode are almost completely formed at the expense of Joule heat inside the electrolyte. The conditions to minimize heat losses to the liquid electrolyte cathode were analyzed.*

PACS: 52.80.-s

*Keywords:* gas discharge, liquid electrode, electrolyte cathode, contact glow discharge electrolysis, mass carryover of electrolyte.

### REFERENCES

1. E. S. Bobkova, and V. V. Rybkin, Plasma Chem. Plasma Process. **35**, 133 (2015).
2. Yu. A. Barinov, I. L. Kuzikova, S. V. Zinov'eva, S. M. Shkol'nik, and N. G. Medvedeva, Technical Physics Letters **41** (17), 68 (2015).
3. B. Jiang, J. Zheng, S. Qiu, M. Wu, Q. Zhang, Z. Yan, and Q. Xue, Chem. Eng. J. **236**, 348 (2014).
4. A. I. Maksimov and A. V. Khlustova, Prikladnaya Fizika, No. 5, 62 (2012).
5. Y. V. Titova, V. G. Stokozenko, Y. V. Nemanova, and A. I. Maksimov, Khimiya Vysokich Energiy. **46** (5), 412 (2012).
6. L. N. Kashapov, N.F. Kashapov, and R. N. Kashapov, J. Phys.: Conf. Ser. **567**, 012025 (2014).
7. R. A. Valiev, Yu. I. Shakirov, and A. N. Iliuchin, J. Phys.: Conf. Ser. **567**, 012040 (2014).
8. G. Saito G., and T. Akiyama, Journal of Nanomaterials. **2015**, 123696 (2015).
9. V. S. Burakov, E. A. Nevar, M. I. Nedel'ko, and N. V. Tarasenko, Russian Journal of General Chemistry **85** (5), 1222 (2015).
10. N. A. Kareem, A. and A. Kaliani, Ionics. **18** (3), 315 (2012).
11. A. Kh. Tazmeev, S. V. Fridland and M. N. Miftakhov, Vestn. Kazan. Tekhnol. Univer., No. 6, 43 (2006).
12. Kh. K. Tazmeev, and A. Kh. Tazmeev, Heat Transfer Research. **36** (8), 623 (2005).
13. M. N. Miftakhov, Kh. K. Tazmeev, A. Kh. Tazmeev, and S. V. Fridland, Journal of Engineering Physics and Thermophysics **79** (3), 109 (2006).
14. R. N. Tazmeeva, and B. Kh. Tazmeev, Prikladnaya Fizika, No. 1, 35 (2014).
15. Kh. K. Tazmeev, I. M. Arslanov I. M., G. Kh. Tazmeev, J. Phys.: Conf. Ser. **567**, 012001 (2014).

\* \* \*