

УДК 537.523.9  
EDN: VJNUFN

PACS: 52.80.-s

**Влияние температуры электролита на образование мелкомасштабных пульсаций тока в газовом разряде с жидким катодом**

© Г. Х. Тазмеев\*, А. Х. Тазмеев

*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Набережночелнинский институт,  
г. Набережные Челны, 423812 Россия**\* E-mail: gktazmeev@kpfu.ru**Статья поступила в редакцию 29.01.2025; после доработки 25.04.2025; принята к публикации 11.08.2025  
Шифр научной специальности: 1.3.9*

**Экспериментально исследован газовый разряд с жидким электролитным катодом в следующих диапазонах параметров: ток 80–170 мА, температура электролита 5–70 °С, межэлектродное расстояние 2–8 мм. В качестве катода был использован водный раствор хлорида натрия с молярной концентрацией 0,1 моль/л. Образование пульсаций тока рассмотрены в предположении капельного переноса вещества из водного раствора в плазму разряда.**

**Ключевые слова:** газовый разряд; граница жидкость-плазма; капельный перенос вещества; перенос зарядов; разряд с жидким катодом; воднорастворный катод; пульсации тока.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-4-45-50

**Введение**

Газовые разряды, создаваемые с использованием жидких электролитов в качестве электродов, являются источниками плазмы с обширными возможностями для практических применений [1, 2]. В работах многих авторов рассматривается газовый разряд с жидким электролитным катодом [3–7]. Получен большой объем экспериментальных данных об электрических, тепловых и оптических свойствах разряда. Однако еще нет полной ясности в процессах переноса вещества и зарядов, происходящих на границе «плазма-жидкий катод». В работах [8, 9] предполагается, что перенос вещества электролита в плазму происходит за счет локального неравновесного испарения под воздействием потока ионов, бомбардирующих катод. Однако при таком подходе остается неясным механизм образования капелек. Не раскрывается механизм распыления катода в виде мелких капель.

В работе [10] изложены результаты, полученные с использованием водного раствора

хлорида натрия в качестве жидкого электролитного катода. Авторами предложены два механизма генерации капель из электролитного катода. Первый – это искажение формы поверхности электролита. Капли образуются на кончике конусообразной поверхности электролита с помощью процесса, аналогичного электрораспылению. Применение высокоскоростной видеосъемки выявило, что первый механизм работает на ранней стадии временной эволюции разряда. Второй механизм – это взрывная реакция между частицами натрия и водой. Предполагается, что частицы натрия образуются из атомов в газовой фазе. При этом остаются открытыми вопросы о том, как образуются частицы натрия и почему они не сдуваются паровоздушным потоком, а направляются к водному раствору (электролитному катоду). Считается, что за счет второго механизма процесс распыления жидкого катода становится самоподдерживающимся.

В работе [11] представлены результаты спектроскопических исследований плазмы разряда с электродом на основе дистиллиро-

ванной воды. Проанализированы оптические эффекты, возникающие под действием различных факторов. Оказалось, что одним из таких факторов является температура воды, которая служит катодом. Обнаружено уменьшение интенсивности полосы ОН в два раза при повышении температуры воды от 30 до 60 °С. Предполагается, что такой эффект вызван увеличением парциального давления паров воды.

Влияние температуры жидкого катода на свойства разряда целенаправленно изучено авторами работы [12]. Разряд постоянного тока горел между жидким электролитным катодом и металлическим соплом-анодом, из которого вытекал миниатюрный поток гелия. В качестве катода был использован водный раствор хлорида натрия. Выявлено существенное влияние температуры жидкого электролитного катода на вынос натрия в плазму. Интенсивность излучения натрия уменьшалась при охлаждении катода электролита и увеличивалась при его нагревании. При подаче импульсно-модулированного постоянного напряжения излучение натрия происходило с задержкой относительно начала разряда.

Таким образом, изменение температуры жидкого электролита существенно влияет на процессы переноса вещества из электролитного катода в плазму. Целью данной работы явилось изучение влияния температуры жидкого электролита на капельный перенос на основе анализа осциллограмм тока.

### Эксперимент

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Разряд горел в воздухе между металлическим анодом 1 и жидким электролитным катодом 2. Зажигание осуществлялось контактным способом с помощью вспомогательного металлического электрода 4. Межэлектродное расстояние (далее  $l$ ) устанавливалось изменением уровня жидкого электролита в емкости 3. Анод представлял собой вольфрамовый стержень с диаметром 3 мм. В качестве электролита служил водный раствор хлорида натрия с молярной концентрацией 0,1 моль/л. Для создания электрического контакта с жидким электролитом использовался графитовый электрод 4. Он был

помещен в сосуд 5 с отверстиями 6 около доньшка. Применение сосуда 5 предотвращало проникновение электролизного водорода, образуемого на поверхности электрода 4, в разрядную зону под анодом 1. Тем самым исключались пульсации тока, которые могли возникнуть из-за попадания пузырьков водорода в разрядную зону. Электрическое питание подавалось от источника 10, снабженного индукционно-емкостным фильтром. Выходное напряжение составляло 1740 В. Ток регулировался изменением сопротивления балластного резистора R1 в пределах 6–12 кОм. Осциллограммы тока регистрировались цифровым осциллографом 9 (АКИП-15/1 имеющий полосу пропускания 25 МГц) при помощи шунта R2 = 10 Ом. Температура электролита измерялась ртутным термометром 8 с ценой деления 1 °С.

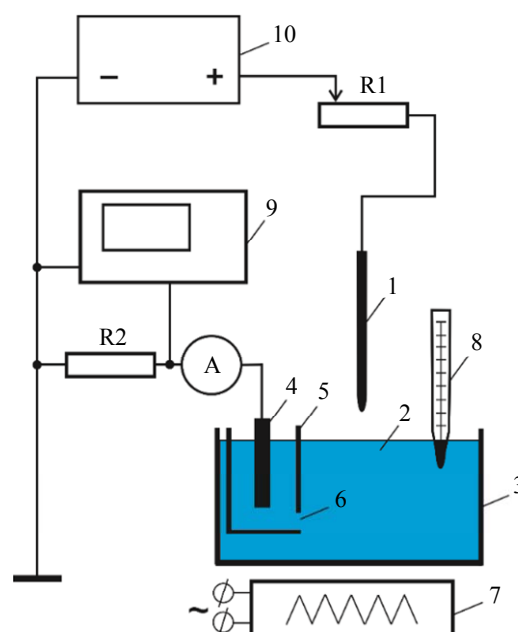


Рис. 1. Экспериментальная установка

Для повышения температуры водного раствора использовался электронагреватель 7 с мощностью 1 кВт. Равномерность нагрева осуществлялась механическим перемешиванием. Измерения проводились при выключенном нагревателе в течении короткого времени, составляющем около 1 минуты. За такое непродолжительное время температура водного раствора менялась незначительно (не более 1 °С). Для опытов с температурами ниже комнатной использовались растворы, которые были предварительно охлаждены.

Длительность отдельного эксперимента (время, в течение которого производилось зажигание разряда, измерение температуры раствора и регистрация осциллограмм) не превышало 1 мин. Опыты, проведенные контактным методом (соприкосновением металлического анода с жидким катодом при максимальном токе 170 мА), показали, что джоулевым нагревом раствора (жидкого катода) в пределах длительности эксперимента можно пренебречь.

Мгновенные фотографии разряда были получены с помощью скоростной видеокамеры ВИДЕОСКАН-401.

### Результаты экспериментов и их анализ

На рис. 2 приведены осциллограммы тока, которые являются характерными для режимов горения разряда в малом и более про-

тяженном разрядном промежутках (2 и 8 мм). В случае горения разряда в малом промежутке пульсации тока незначительны (рис. 2а–в). При увеличении температуры электролита на осциллограммах появляется фон, состоящий из вертикальных штрихов. Такой фон затрудняет наблюдение пульсаций тока (рис. 2в). Причиной появления фона является термическое разрушение анода с образованием металлических микрочастиц.

Опыты показали, что влияние температуры электролита становится значимым при увеличении межэлектродного расстояния  $l$ . При этом повышение температуры приводит к существенному усилению пульсаций. Такую закономерность наглядно демонстрируют осциллограммы на рис. 2г–е. Амплитуда пульсаций постепенно возрастает и при температуре 70 °С достигает до десятков миллиампер (рис. 2е).

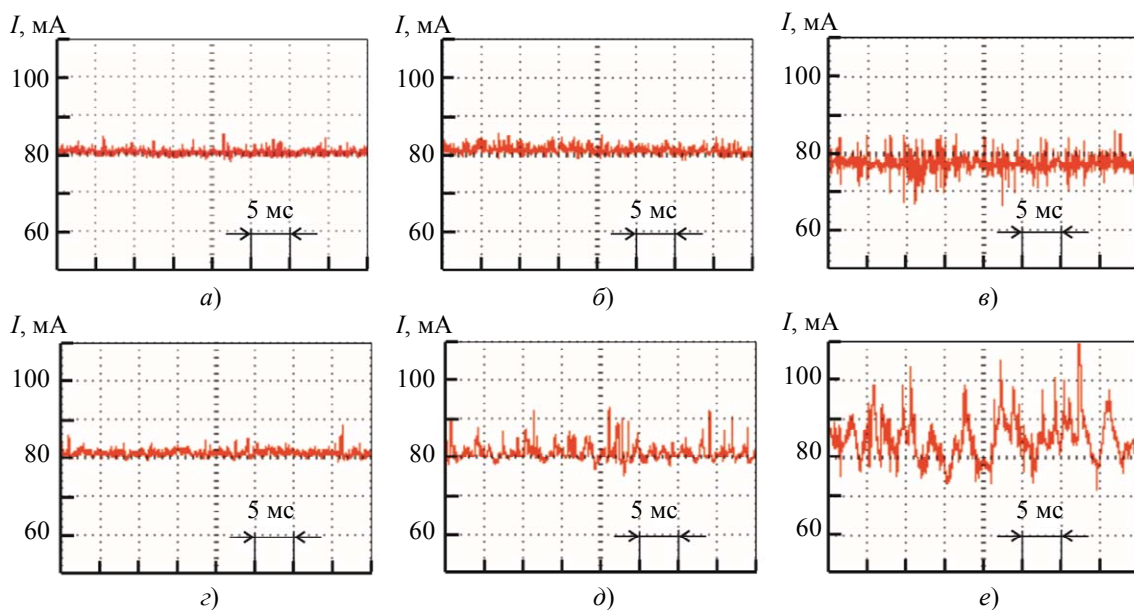


Рис. 2. Осциллограммы тока. Межэлектродное расстояние: а), б), в) – 2 мм; г), д), е) – 8 мм. Температура электролита: а), г) – 6 °С; б), д) – 20 °С; в), е) – 70 °С

Особенностью пульсаций тока является то, что они возникают как скачки тока в сторону увеличения от некоторого номинального значения. При этом их частота и амплитуда меняются случайным образом. Исходя из таких закономерностей, наблюдаемых на осциллограммах, можно предположить, что пульсации тока образуются из-за выноса капель жидкого электролита катода в разрядную область. В составе капель выносятся натрий, содержащийся в электролите. В разрядной обла-

сти атомы натрия ионизируются. При этом электроны, которые появляются при ионизации атомов натрия, легко приходят в движение под действием электрического поля и начинают участвовать в создании электрического тока. Таким образом получается, что каждая капелька выносит в разрядную область порцию носителей тока. Из-за этого происходят скачкообразные изменения тока в сторону увеличения. Одновременно с ионизацией происходят процессы рекомбинации. Естествен-

но, при этом количество электронов уменьшается и ток убывает до номинального значения.

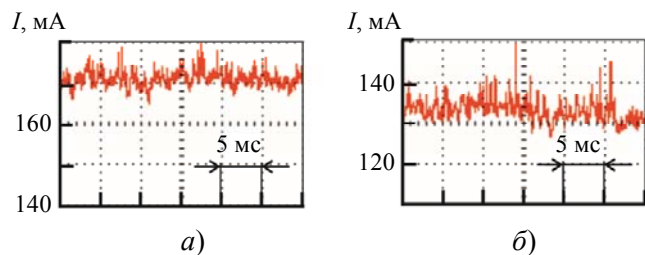


Рис. 3. Осциллограммы при повышенных токах. а) –  $l = 2$  мм, температура электролита  $20$  °С; б) –  $l = 8$  мм, температура электролита  $6$  °С

На рис. 3 приведены осциллограммы, зарегистрированные при повышенных токах. Температурные режимы выбраны так, чтобы была возможность сравнения с осциллограммами на рис. 2. Можно сравнивать рис. 3а с рис. 2б, а также рис. 3б с рис. 2г. В обоих случаях выявляется одна и та же закономерность: при одних и тех же температурах электролита вместо незначительных пульсаций (рис. 2б и 2г) появляются более интенсивные (рис. 3а и 3б). Следовательно, повышение тока способствует усилению пульсаций тока. По-видимому, такая ситуация связана с тепловыми явлениями на поверхности электролита в зоне привязки разряда. Основным каналом поступления энергии на электролитный катод является бомбардировка положительными ионами, ускоренными электрическим полем. С увеличением тока количество бомбардирующих ионов возрастает. Энергия поступает больше, и она не может быть удалена мгновенно за счет теплопроводности и конвекции.

Возникает бурное локальное кипение с выбросом капелек. Натрий, содержащийся в капельках, выступает в роли индикатора такого взрывного кипения. Как уже было отмечено, попадая в разрядную область, он способствует возникновению пульсаций тока.

Еще одной особенностью пульсаций тока является то, что они наиболее интенсивны при сравнительно низких частотах. Такая особенность отчетливо проявилась в спектрах пульсаций, полученных с использованием функции Фурье-анализа осциллографа. Для наглядности на рис. 4 приведен один из спектров, сформированных случайным образом. Здесь можно выделить интервал частот  $0-1,0$  кГц, где амплитуда пульсаций тока имеет наибольшие значения. При частотах выше  $1,0$  кГц фиксируется монотонная картина без каких-либо значимых максимумов амплитуды. Эти же закономерности наблюдались и при низких, и при повышенных температурах водного раствора (жидкого катода).

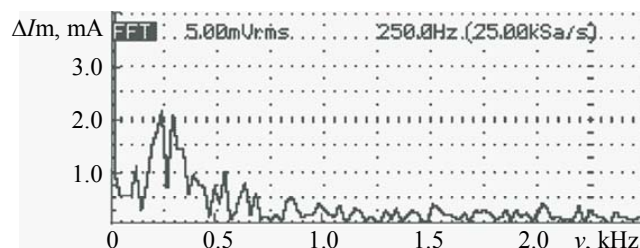


Рис. 4. Спектр пульсаций тока. Температура электролита  $70$  °С.  $l = 6$  мм.  $I = 100$  мА

Благодаря переносу натрия из электролита в разрядную область межэлектродное пространство окрашивается желтым цветом (рис. 5).

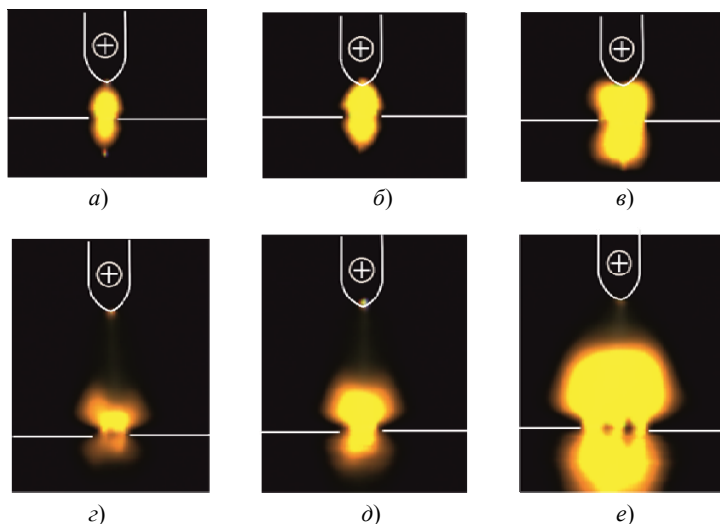


Рис. 5. Мгновенные фото разряда. Белыми линиями обозначены контуры анода и поверхность электролита. На поверхности раствора видно отражение разрядного столба. Экспозиция  $1$  мс. Межэлектродное расстояние: а), б), в) –  $2$  мм; г), д), е) –  $8$  мм. Температура электролита: а), г) –  $6$  °С; б), д) –  $20$  °С; в), е) –  $70$  °С

В случае горения разряда на коротких промежутках межэлектродное пространство практически полностью заполняется желтым облаком (рис. 5а–в). При увеличении температуры электролита желтое облако расширяется и начинает обволакивать торец анода (рис. 5в). По-видимому, в таких условиях анод нагревается сильнее. Он начинает эродировать, и поэтому на осциллограммах появляется фон (рис. 2в). При горении разряда в более протяженных промежутках желтое облако примыкает к поверхности электролита (рис. 5г, 5в и 5е). Повышение температуры электролита до 70 °С приводит к многократному увеличению его размеров (рис. 5е). Такая картина свидетельствует о существенном увеличении количества вещества, поступающего от жидкого электролита в разрядную область. Часть вещества выносится в виде капелек. Чем выше температура электролита, тем интенсивней становится капельный перенос вещества.

### Заключение

Экспериментально установлено, что мелкомасштабные пульсации тока, возникающие в газовом разряде с жидким электролитным катодом, в значительной степени зависят от температуры электролита. Увеличение температуры электролита приводит к усилению их интенсивности. При пониженных температурах могут быть реализованы режимы горения с незначительными пульсациями тока. Закономерности образования пульсаций соответствуют капельной модели переноса вещества из жидкого катода в плазму. Полученные данные могут найти применение в более детальной разработке этой модели.

Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан», соглашение № 42/2024-ПД от 16.12.2024.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reuter S., Hamdan A. / Plasma Processes and Polymers. 2025. Vol. 22 (1). P. 2400278.
2. Bruggeman P. J. et al. / Plasma sources science and technology. 2016. Vol. 25. № 5. P. 053002.
3. Verreycken T., Schram D. C., Leys C., Bruggeman P. / Plasma Sources Sci. Technol. 2010. Vol. 19. P. 045004.
4. Сироткин Н. А., Тимов В. А. / Прикладная физика. 2016. № 6. С. 25–31.
5. Баринев Ю. А. / Прикладная физика. 2023. № 6. С. 19–22.
6. Чистилинов А. В., Якушин Р. В., Лубин А. А., Перфильева А. В. / Прикладная физика. 2024. № 4. С. 5–13.
7. Тазмеев Г. Х., Тимеркаев Б. А., Тазмеев Х. К., Мифтахов М. Н. / Химия высоких энергий. 2018. Т. 52. № 1. С. 83–86.
8. Захаров А. Г., Максимов А. И., Тимова Ю. В. / Успехи химии. 2007. Т. 76. № 3. С. 260.
9. Хлюстова А. В., Максимов А. И., Сироткин Н. А. / Электронная обработка материалов. 2011. Т. 47. № 2. С. 66–69.
10. Shirai N., Suga G., Sasaki K. / Plasma Sources Sci. Technol. 2020. Vol. 29. P. 025007.
11. Чучман М. П. и др. // ЖПС. 2016. Т. 83. № 5. С. 742.
12. Shirai N., Ichinose K., Uchida S., Tochikubo F. / Plasma Sources Sci. Technol. 2011. Vol. 20. P. 034013.

PACS: 52.80.-s

## Influence of electrolyte temperature on the formation of small-scale current pulsations in a gas discharge with a liquid cathode

G. K. Tazmееv\* and A. K. Tazmееv

Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny Institute, Naberezhnye Chelny, 423812 Russia  
\*E-mail: gktazmееv@kpfu.ru

Received 29.01.2025; revised 25.04.2025; accepted 11.08.2025

*A gas discharge with a liquid electrolyte cathode was experimentally studied in the following parameter ranges: current 80–170 mA, electrolyte temperature 5–70 °C, interelectrode distance*

***2–8 mm. An aqueous solution of sodium chloride with a molar concentration of 0.1 mol/l was used as a cathode. The formation of current pulsations was considered under the assumption of droplet transfer of matter from the aqueous solution to the discharge plasma.***

**Keywords:** gas discharge; liquid-plasma interface; droplet transfer of matter; charge transfer; liquid cathode discharge; water-solution cathode; current pulsations.

## REFERENCES

1. Reuter S. and Hamdan A., Plasma Processes and Polymers **22** (1), 2400278 (2025).
2. Bruggeman P. J. et al., Plasma sources science and technology **25** (5), 053002 (2016).
3. Verreycken T., Schram D. C., Leys C. and Bruggeman P., Plasma Sources Sci. Technol. **19**, 045004 (2010).
4. Sirotkin N. A. and Titov V. A., Applied Physics, № 6, 25 (2016) [in Russian].
5. Barinov Yu. A., Applied Physics, № 6, 19–22 (2023) [in Russian].
6. Chistolinov A. V., Yakushin R. V., Lubin A. A. and Perfilieva A. V., Applied Physics, № 4, 5–13 (2024) [in Russian].
7. Tazmeev G. K., Timerkaev B. A., Tazmeev K. K. and Miftakhov M. N., High Energy Chemistry **52** (1), 99 (2018).
8. Zakharov A. G., Maksimov A. I. and Titova Yu. V., Russian Chemical Reviews **76**, 235 (2007).
9. Khlyustova A. V., Maksimov A. I. and Sirotkin N. A., Elektronnaya obrabotka materialov **47**, 66 (2011).
10. Shirai N., Suga G. and Sasaki K., Plasma Sources Sci. Technol. **29**, 025007 (2020).
11. Chuchman M. P. et al., Journal of Applied Spectroscopy **83** (5), 781 (2016).
12. Shirai N., Ichinose K., Uchida S. and Tochikubo F., Plasma Sources Sci. Technol. **20**, 034013 (2011).

## Об авторах

**Тазмеев Гаяз Харисович**, к.т.н., доцент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Набережно-челнинский институт (423812, Россия, г. Набережные Челны, проспект Мира, д. 68/19). E-mail: gktazmeev@kpfu.ru  
SPIN-код РИНЦ 2893-0027, Author ID 937904

**Тазмеев Алмаз Харисович**, к.х.н., доцент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Набережно-челнинский институт (423812, Россия, г. Набережные Челны, проспект Мира, д. 68/19). E-mail: tazmeev@gmail.com  
SPIN-код РИНЦ 9342-6714, Author ID 719638