

УДК 537.523.9

О причинах возникновения высокочастотных пульсаций тока в электрических разрядах с прямым контактом с жидкими электролитами

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

Экспериментально исследованы электрические разряды атмосферного давления между жидким электролитным и металлическим электродами в различных вариантах полярности их подключения к источнику питания. Получены и проанализированы спектры сигналов тока в мегагерцовом диапазоне изменения частоты. Выявлено, что возникновению высокочастотных пульсаций тока сопутствуют явления распыления и эрозии электродов.

PACS: 52.80.-s

Ключевые слова: газовый разряд, высокочастотные пульсации тока, жидкий электрод, электролитный катод, электролитный анод.

Введение

История электрических разрядов, контактирующих с жидкостью, насчитывает более ста лет. Начало экспериментальных исследований относится к концу XIX века [1, 2]. Промышленное применение нашли высоковольтные импульсные разряды в воде для штамповки крупногабаритных тонкостенных изделий из металлических листов [3]. В машиностроении широкое распространение получили процессы модификации металлических поверхностей внутри электролита под воздействием электрического разряда [4, 5]. Ведутся исследования по использованию электрических разрядов, различным образом контактирующих с жидкими растворами, в текстильной промышленности [6—8]. Экспериментально установлена возможность использования электрического разряда с жидким электролитным катодом для газификации полимерных отходов [9]. Другие перспективные направления практического применения вкратце перечислены в обзоре [10].

Тем не менее, несмотря на давнюю историю и достаточно широкое использование в прикладных задачах, электрические разряды, контактирующие с жидкостью, изучены на сегодняшний день недостаточно полно, особенно в малых пространственных и временных интервалах. Одним из свойств, которые проявляются в малых интервалах времени, является наличие высокочастотных пульсаций тока. Такие пульсации тока преимущественно проявляются при повышенных значениях тока, составляющих сотни миллиампер и более. Они зафиксированы в электрических разрядах различных видов: горящих между металлическими электродами, утопленными в электролит [11]; формируемых в открытом воздухе между жидкостью и металлом [12], а также между двумя жидкими электродами [13].

Для объяснения происхождения высокочастотных пульсаций тока в работе [11] выдвинуто предположение о том, что в замкнутом разрядном объеме внутри электролита могут возникнуть магнитозвуковые волны с частотами в мегагерцовом диапазоне. С другой стороны, в ряде работ высокочастотные пульсации тока не обсуждаются, несмотря на их явное присутствие на осциллограммах [14—16].

Таким образом, в настоящее время отсутствует ясное представление о природе появления высокочастотных пульсаций тока в электрических разрядах с прямым контактом к жидким электролитам.

Целью данной работы явилось экспериментальное исследование высокочастотных пульсаций тока в электрических разрядах с электролитическими и металлическими электродами, причем при контролируемых условиях в различных вариантах комбинации жидких и твердотельных электродов и по фазовому состоянию, и по полярности подключения к источнику питания.

Тазмеев Харис Каюмович, доцент¹.

Тимеркаев Борис Ахунович, профессор².

Тазмеев Гаяз Харисович, аспирант².

Сарваров Фарит Сарварович, доцент¹.

Арсланов Ильяс Миргарифович, инженер¹.

¹Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета.

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

Тел. 8 (8552) 39-59-72. Факс (8552) 39-59-72.

E-mail: tazmeevh@mail.ru

²Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева.

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

Тел. 8 (843) 231-02-24.

Статья поступила в редакцию 25 февраля 2015 г.

© Тазмеев Х. К., Тимеркаев Б. А., Тазмеев Г. Х., Сарваров Ф. С., Арсланов И. М., 2015

Эксперимент

Исследования проводились с помощью осциллографа АКИП-15/1 с полосой пропускания 25 МГц. Анализ колебаний тока осуществлялся с использованием режима быстрого преобразования Фурье этого же осциллографа. Источником питания для получения газового разряда служил трехфазный двухполупериодный выпрямитель, подключенный к вторичным обмоткам повышающего трансформатора. Выходное напряжение сглаживалось емкостно-индуктивным фильтром. На холостом ходу оно составило 1760 В. Ограничение тока производилось проволочными резисторами типа ПЭВ.

В экспериментальной практике наиболее часто твердотельные электроды изготавливаются из меди, а в качестве жидкого электролита используются растворы поваренной соли в дистиллированной воде. Результаты экспериментов для такой комбинации электродов представлены в верхнем ряду рис. 1. Картинкам на правой и левой половинах рисунка соответствуют противоположные полярности подключения электродов к источнику питания. В левой половине катод — жидкий электролит, а анод — заостренный под конус медный стержень с диаметром 4,5 мм. На рисунке контуры медного стержня обозначены белыми линиями. В правой половинке, наоборот, жидкий электролит

является анодом, а катодом служит медный стержень. При этом диаметр медного стержня намного больше ($\varnothing 14$ мм) и вершина конуса закруглена. Такой вариант изготовления анода явился вынужденным, т. к. медный стержень с диаметром 4,5 мм при длительном горении разряда интенсивно оплавлялся и выходил из строя.

Удельная электрическая проводимость электролита составляла 10 мСм/см. Он был налит в фарфоровый сосуд. Внутри сосуда находилась графитовая пластина, которая соединялась с выходной клеммой источника питания. Расстояние между жидким электролитом и медным стержнем устанавливалось равным 5 мм. Такое же межэлектродное расстояние выдерживалось и во всех последующих опытах с другими электродами.

Моментальные фотографии разряда были получены с помощью скоростной видеокамеры ВИДЕОСКАН-401. Для всех представленных фотографий диафрагма раскрыта одинаково, а также выбрана одна и та же экспозиция, равная 1 мс. Как видно из двух фотографий, размещенных на верхнем ряду рис. 1, разряд с жидким электролитным катодом является объемным и зона его привязки к электролиту имеет достаточно большую площадь (левое фото). Разряд с жидким электролитным анодом светится в виде узкого канала, и при этом ярче всего светит зона его привязки к медному катоду (правое фото).

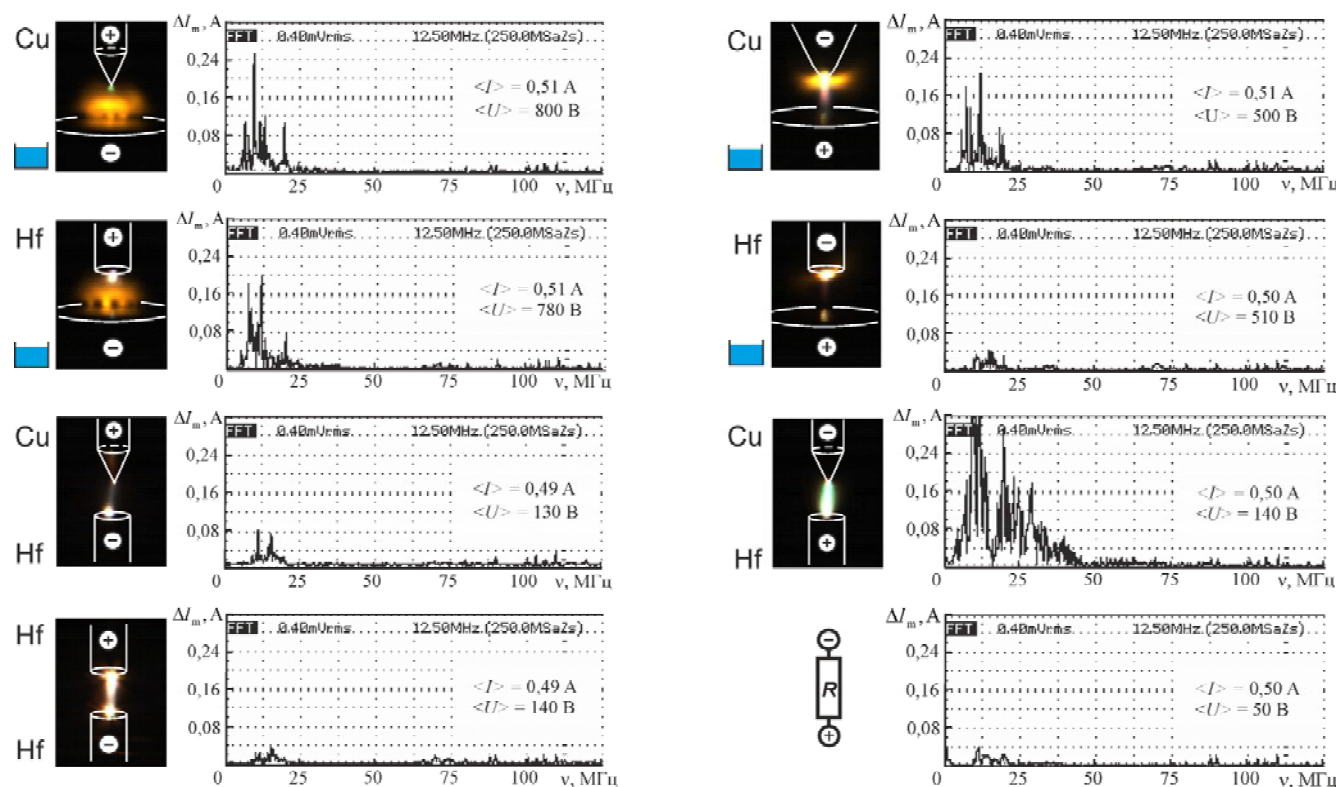


Рис. 1. Моментальные фотографии электрических разрядов и спектры пульсаций тока

Рядом с фотографиями расположены типичные спектры сигналов, поступивших в осциллограф. Там же приведены показания стрелочных приборов М2016 и М2015, которые использовались в качестве амперметра и вольтметра для измерения средних значений тока разряда $\langle I \rangle$ и напряжения $\langle U \rangle$ между катодом и анодом. С целью обеспечения одинаковых условий в экспериментах осциллограммы зарегистрировались при одном и том же токе. Сигналом для регистрации разрядного тока служило падение напряжения на шунте с сопротивлением 0,01 Ом. Как видно, в обоих вариантах полярности жидкого электролита присутствуют высокочастотные пульсации тока в мегагерцовом диапазоне, находящиеся в полосе пропускания используемого осциллографа (до 25 МГц). При этом в обоих вариантах эффективные амплитуды пульсаций ΔI_m являются значительными и их максимальные значения приближаются к 50 % от среднего разрядного тока $\langle I \rangle$.

Таким образом, несмотря на наличие существенных внешних различий, в обоих вариантах разряда наблюдались схожие между собой пульсации тока. Прделанные опыты не позволили четко и ясно выявить возможность влияния материала электродов на образование пульсаций тока в высокочастотном диапазоне. В данном вопросе ясность проявилась при использовании тугоплавкого твердотельного электрода, т. е. после замены медного электрода на гафний (Hf), который представлял собой отрезок стержня диаметром 5 мм. В комбинации электродов «гафний — электролит» смена полярности привела к резкому изменению спектра сигналов от разрядного тока. При этом в варианте с жидким электролитным катодом изменения оказались несущественными по сравнению с комбинацией «медь — электролит» и в спектре сигналов, и в фотоизображении разряда (рис. 1, второй ряд сверху, левая половина). А в варианте с жидким электролитным анодом пульсации тока практически исчезли (рис. 1, тот же ряд, правая половина). Зафиксированный спектр сигнала по форме получился схожим на спектр шумов, образуемых при прохождении тока через резистор (рис. 1, нижний ряд, правая половина).

Смена полярности медного электрода в сочетании с тугоплавким гафнием также привело к резкому изменению спектра сигналов от разрядного тока (рис. 1, второй ряд снизу). При этом возмущения, влияющие на сигналы, были настолько сильными, что эффективные амплитуды получились чрезмерно большими по сравнению со средним значением разрядного тока (рис. 1, тот же ряд, правая половина).

Результаты проделанных экспериментов (с привлечением данных работы [13] для двух

жидких электродов) обобщены в таблице. Варианты комбинаций электродов, при которых возникают высокочастотные пульсации тока в мегагерцовом диапазоне, отмечены знаком «+». В отмеченных вариантах происходят процессы либо распыления электролита, либо эрозии металла. Поэтому можно считать, что причиной возникновения высокочастотных пульсаций тока является поступление в разрядную область токопроводящего материала в дисперсном виде. Дисперсные частицы разрушаются в разрядной области и меняют состав плазмообразующей среды. При этом происходит локальное изменение электрической проводимости разрядного канала и возникают пульсации тока.

Таблица

Анод	Катод		
	электролит	медь	гафний
электролит	+	+	–
медь	+	+	–
гафний	+	+	–

На происхождение процесса эрозии медного катода указывают следующие факторы. Во-первых, на поверхности катода остаются следы эрозии. Во-вторых, в плазменном столбе наблюдается зеленоватое свечение, характерное для паров меди, и, в-третьих, в спектре излучения газового разряда фиксируются спектральные линии атома меди. В варианте комбинации «медь-гафний» спектральные линии меди оказались преобладающими по интенсивности в видимом диапазоне длин волн (рис. 2). Здесь запись спектра излучения осуществлялась оптоволоконным спектрометром AvaSpec-3648.

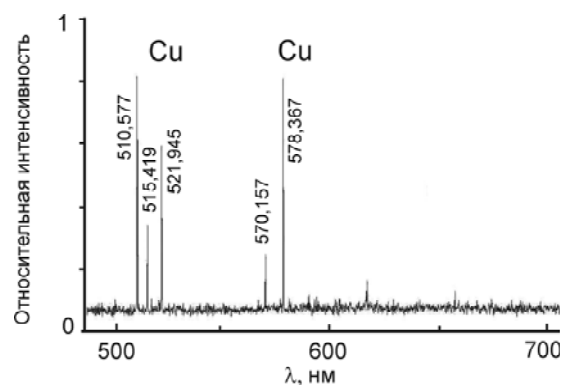


Рис. 2. Спектр излучения электрического разряда между медным катодом и гафниевым анодом

Опыты показали, что визуализация распыления жидкого электролитного катода становится возможным при повышенных токах разряда. В таких режимах горения электролит нагревается и требуется его вынужденное охлаждение. Один из

способов съема тепла от электролита технически реализован в работе [17].

На рис. 3 приведена фотография разряда между проточным электролитным катодом и медным охлаждаемым анодом, полученная с использованием технической системы работы [17].

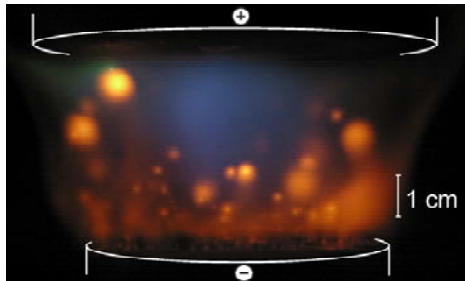


Рис. 3. Моментальная фотография электрического разряда между проточным электролитным катодом и медным анодом

Кадр снят фотоаппаратом Canon PowerShot S70. Была выставлена экспозиция равная 1/2000 с. Белыми линиями обозначены контуры катода и анода. Электролит (водный раствор поваренной соли) вытекал из вертикального цилиндрического канала с внешним диаметром 75 мм. Его удельная электрическая проводимость составила 2,5 мСм/см. Средний ток разряда $\langle I \rangle = 5,5$ А. Межэлектродное расстояние равно 5 см. Усредненное напряжение между катодом и анодом $\langle U \rangle = 2320$ В. На фотографии отчетливо выделяются желтые «пузыри», которые, по всей вероятности, представляют собой сферические образования, формируемые вследствие попадания капелек электролита в разрядный промежуток. Эта фотография позволяет трактовать физическую картину протекания электрического тока между двумя твердыми электродами, разделенными электролитом и газопаровой средой. Ясно, что на графитовый электрод, размещенный внутри электролита, электрический ток замыкается положительными ионами натрия. В сторону положительного медного электрода в электролите движутся отрицательные ионы хлора. Однако на поверхности электролита ионам хлора необходимо преодолеть как силу поверхностного натяжения, так и работу выхода. Поток ионов на поверхность электролита, как показали осциллограммы токов и напряжений, тоже является непостоянным во времени. Следовательно, локальный нагрев у поверхности электролита, вызванный этим потоком, тоже будет непостоянным. В моменты попадания большой порции ионов на поверхность электролит выбрасывается не в паровой, а в капельной фазе. Эти капли электролита в дальнейшем под термическим воздействием плазмы распадаются в паровую фазу, а ионы электролита становятся участниками электропроводности

данного участка электрической цепи. Положительные ионы данной капли через определенное время станут причиной появления новой взрывной капли. Желтый цвет свечения капелек говорит о том, что в составе капель и в самом разряде в достаточном количестве присутствуют ионы натрия. В непосредственной близости от анода возможен электронный ток. Об этом свидетельствует голубоватый цвет разряда, вызванный свечением молекул воздуха.

Заключение

Как показано в проведенных исследованиях, основной причиной возникновения высокочастотных пульсаций тока в электрических разрядах, контактирующих с жидкими электролитами, является распыление электролита и поступление жидких капелек в разрядную область. В результате резкой тепловой деструкции этих капелек электролита высвобождаются в значительном количестве ионы, что приводит к локальным всплескам концентрации носителей тока. Как следствие, возникают быстропеременные флуктуации электрической проводимости межэлектродного пространства и образуются пульсации тока с различными частотами и амплитудами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Слугинов Н. П. // Журн. Русск. физ.-хим. об-ва. 1878. Т. 10. Вып. 8. С. 241.
2. Gubkin J. // Ann. Phys. 1887. V. 32. P. 114.
3. Наугольных К. А., Рой Н. А. Электрические разряды в воде. — М.: Наука, 1971.
4. Ясногородский И. 3. Нагрев металлов и сплавов в электролите. — М.: Машгиз, 1949.
5. Суминов И. В., Белкин П. Н., Эпельфельд А. В. и др. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. Т. 1. — М.: Техносфера, 2011.
6. Максимов А. И., Хлюстова А. В. // Прикладная физика. 2012. № 5. С. 62.
7. Тутова Ю. В., Стокозенко В. Г., Неманова Ю. В. и др. // ХВЭ. 2012. Т. 46. № 5. С. 412.
8. Максимов А. И., Хлюстова А. В., Субботкина И. Н. // Известия вузов. Серия: Химия и химическая технология. 2009. Т. 52. № 9. С. 116.
9. Фридланд С. В., Тазмеев А. Х., Мифтахов М. Н. и др. // Вестник машиностроения. 2006. № 7. С. 72.
10. Samukawa S., Hori M., Rauf S., et al. // Phys. D: Appl. Phys. 2012. V. 45. № 25. P. 253001.
11. Курко Д. Л., Савелов А. С., Визгалов И. В. // Вестник Казанского Технологического Университета. 2011. № 15. С. 86.
12. Тазмеев Х. К., Арсланов И. М., Тазмеев Г. Х. // Известия вузов. Физика. 2014. Т. 57. № 3-2. С. 227.
13. Tazmeev B. Kh., Khairullin A. Kh. / Fifth Europ. Conf. TPP-5. 1998. St. Petersburg. P. 63.
14. Rybina A. N., Sochugov N. S., Podkovirov V. G. / Proc. 15th Int. Symp. on High Current Electronics. Tomsk, Russia. 2008. P. 349.
15. Park S., Yoon S., Kim G. / Proc. ISPC 19. 2009. Bochum, Germany. P. 647.

16. Fujita H., Kanazawa S., Ohtani K., et al. / Proc. ISPC 21. 2013. Queensland, Australia. P. 422.

17. Tazmeev Kh. K., Tazmeev A. Kh. // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. V. 567. P. 012035.

About reasons for emergence of high-frequency current pulsation in electric discharges with direct contact to the liquid electrolyte

Kh. K. Tazmeev¹, B. A. Timerkaev², G. Kh. Tazmeev², F. S. Sarvarov¹, and I. M. Arslanov¹

¹Naberezhnye Chelny Branch of Kazan Federal University
10A, Sujumbike av., Naberezhnye Chelny, 423812, Russia
E-mail: tazmeevh@mail.ru

²A. N. Tupolev Kazan National Research Technical University
10 K. Marx str., Kazan, 420111, Russia

Received February 25, 2015

Consideration is made to the experimentally investigated electrical discharges in atmospheric pressure between the liquid electrolyte and metal electrodes in various embodiments of the polarity for their connection to a power supply. Obtained and analyzed are the spectra of the current signals in the megahertz range of frequencies. It is revealed that emergence of high-frequency current pulsation is accompanied by phenomena of dispersion and erosion of the electrodes.

PACS: 52.80.-s

Keywords: gas discharge, high-frequency current pulsation, liquid electrode, electrolytic cathode, electrolytic anode.

REFERENCES

1. N. P. Sluginov, Zhurn. Russk. Fiz.-Khim. Obshchestva **10** (8), 241 (1878).
2. J. Gubkin, Ann. Phys. **32**, 114 (1887).
3. K. A. Naugol'nykh and N. A. Roi, *Electrical Discharges in Water* (Nauka, Moscow, 1971) [in Russian].
4. I. Z. Yasnogorsky, *Heating Metals and Alloys in Electrolyte* (Mashgiz, Moscow, 1949) [in Russian].
5. I. V. Suminov, P. N. Belkin, A. V. Epelfeld, et al., *Plasma-Electrolyte Modification of Surface of Metals and Alloys. Vol. 1.* (Tekhnosfera, Moscow, 2011) [in Russian].
6. A. I. Maksimov and A. V. Khlustova, *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 62 (2012).
7. Yu. V. Titova, V. G. Stokozenko, Yu. V. Nemanova, et al., *Khim. Vysok. Energ.* **46**, 412 (2012).
8. A. I. Maksimov, A. B. Khlustova, and I. N. Subbotkina, *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Ser. Khimiya* **52** (9), 116 (2009).
9. S. V. Fridland, A. Kh. Tazmeev, M. N. Mifshtakhov, et al., *Vestn. Mashinostr.*, No. 7, 72 (2006).
10. S. Samukawa, M. Hori, S. Rauf, et al., *Phys. D: Appl. Phys.* **45**, 253001 (2012).
11. D. L. Kirko, A. S. Savelov, and I. V. Vizgalov, *Vestn. Kazan. Tekhnol. Univer.*, No. 15, 86 (2011).
12. Kh. K. Tazmeev, I. M. Arslanov, and G. Kh. Tazmeev, *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Ser. Fizika* **57**, 227 (2014).
13. B. Kh. Tazmeev and A. Kh. Khairullin, in *Proc. Fifth Europ. Conf. TPP-5.* (1998. St. Petersburg). P. 63.
14. A. N. Rybina, N. S. Sochugov, and V. G. Podkovirov, in *Proc. 15th Int. Symp. on High Current Electronics.* (Tomsk, Russia. 2008). P. 349.
15. S. Park, S. Yoon, and G. Kim, in *Proc. ISPC-19.* (2009. Bochum, Germany). P. 647.
16. H. Fujita, S. Kanazawa, K. Ohtani, et al., in *Proc. ISPC-21.* (2013. Queensland, Australia). P. 422.
17. Kh. K. Tazmeev and A. Kh. Tazmeev, *J. Phys.: Conf. Ser.* **567**, 012035 (2014).