

## ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ ТОКА В ГАЗОВОМ РАЗРЯДЕ С ЖИДКИМ ЭЛЕКТРОДОМ

Г.Х. Тазмеев<sup>1</sup>, Б.А. Тимеркаев<sup>1</sup>, Х.К. Тазмеев<sup>2</sup>

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева<sup>1</sup>

Набережночелнинский институт Казанского федерального университета<sup>2</sup>  
tazmeevg@mail.ru

Экспериментально исследованы электрические разряды в воздухе между жидким электролитным и металлическим электродами. Зарегистрированы и проанализированы спектры сигналов тока в мегагерцовом диапазоне изменения частоты. Установлено, что одним из основных причин возникновения высокочастотных пульсаций тока является поступление продуктов распыления и эрозии электродов в разрядную область.

### Введение.

Электрические разряды, контактирующие с жидкостью, не являются редкостью. К такой разновидности в первую очередь можно отнести газовые разряды, возбуждаемые между твердотельными электродами, находящимися в воде или в специально подготовленном электролите [1-3]. Они применяются в промышленности для подводной штамповки крупногабаритных тонкостенных металлических изделий из листового материала, а также плазменно-электролитной модификации металлических поверхностей. Часто встречаются варианты с твердотельным электродом, размещенным над жидким электролитом [4-5]. Они перспективны для инициирования химических процессов в электролитах, которые используются в текстильной промышленности [4]. Такие электрические разряды могут использоваться в плазмохимических реакторах, предназначенных для получения сингаза [5]. Слаботочные разряды могут быть применены в медицине [6]. Однако, несмотря на достаточно широкое распространение на практике, 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. Они зафиксированы в работах разных авторов при различных вариантах образования контактов электрического разряда с жидкими электролитами [7-10]. Авторами работы [9] предполагается, что в замкнутом объеме внутри электролита могут возникнуть магнитозвуковые волны с частотами в мегагерцовом диапазоне. Этого предположения явно недостаточно для объяснения причин появления высокочастотных пульсаций тока во всевозможных вариантах электрических разрядов, контактирующих с жидкими электролитами. Целью данной работы явилось экспериментальное исследование высокочастотных пульсаций тока в газовых разрядах, формируемых в воздушном промежутке между жидким электролитом и твердотельным электродом.

### Эксперимент.

Источником питания служил трехфазный двухполупериодный выпрямитель, подключенный к вторичным обмоткам повышающего трансформатора. Выходное напряжение сглаживалось С-L-С фильтром. На холостом ходу оно составило 1760 В. Ограничение тока производилось проволочными резисторами типа ПЭВ.

Осциллограммы тока регистрировались с помощью осциллографа АКПП-15/1 с полосой пропускания 25 МГц. Анализ колебаний тока осуществлялся с использованием режима быстрого преобразования Фурье этого же осциллографа.

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. Катод представлял собой жидкий электролит, а анод – заостренный под конус медный стержень с диаметром 4,5 мм. На рисунке контуры медного стержня обозначены белыми линиями. 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.

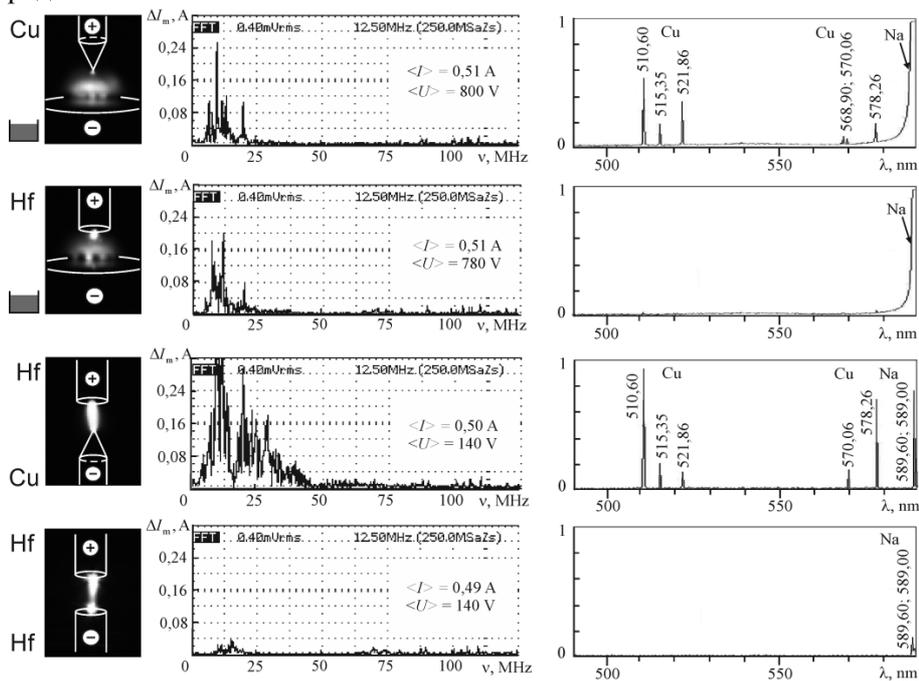


Рис. 1. Варианты комбинаций электродов. Слева направо: моментальная фотография электрического разряда, спектр пульсаций тока, спектр излучения.

Моментальные фотографии разряда были получены с помощью скоростной видеокамеры ВИДЕОСКАН-401, позволяющей снимать до 25 кадров в секунду с минимальной экспозицией 1  $\mu$ s. Для всех, представленных на рис. 1, фотографий диафрагма раскрыта одинаково, и выбрана одна и та же экспозиция, равная 1 мс. Как видно фото, размещенного на верхнем ряду рис. 1, разряд с жидким электролитным катодом является объемным и зона его привязки к электролиту имеет достаточно большую площадь. Плазменный столб разряда окрашен в желтый цвет, что свидетельствует о поступлении натрия от электролита в разрядную область. Наиболее вероятным механизмом такого переноса натрия является распыление электролита и поступление его капелек в плазменный столб. И в самом деле, распыление электролита наблюдалось визуально невооруженным глазом. Кончик медного конуса имеет зеленую окраску. Такая окраска свидетельствует о поступлении атомов меди в прианодную зону разряда.

Рядом с фотографиями расположены типичные спектры сигналов, поступивших в осциллограф. Там же приведены показания стрелочных приборов M2016 и M2015, которые использовались в качестве амперметра и вольтметра для измерения 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 из представленного спектра сигналов (рис.1, верхний ряд) в газовом разряде, возбуждаемом между жидким электролитным катодом и медным анодом, присутствуют высокочастотные пульсации тока в мегагерцовом диапазоне, находящиеся в полосе пропускания используемого осциллографа (до 25 МГц). При этом эффективные амплитуды пульсаций  $\Delta I_m$  являются значительными и их максимальные значения приближаются к 50% среднего разрядного тока  $\langle I \rangle$ .

Справа на верхнем ряду рис. 1 представлен фрагмент спектра излучения электрического разряда в видимом диапазоне длин волн. Там присутствуют спектральные линии меди, что также подтверждает поступление атомов меди в разрядную область. Кривая линия на правом краю является результатом насыщения CDD-детектора спектрометра. Такая картина подтверждает интенсивное поступление натрия в плазменный столб с капельками электролита. Запись спектра излучения осуществлялась оптоволоконным спектрометром AvaSpec-3648 с разрешением 0.15 нм (дифракционная решетка 1200 штрихов/мм, входная оптическая щель 10 мкм). Спектры записывались без усреднения. Время интегрирования одной записи составляло 400 ms. Все последующие записи (для всех комбинаций электродов и их взаимного расположения) выполнялись в таком режиме, что позволяло сравнивать интенсивности спектральных линий в полученных спектрах.

Таким образом, опыты показали, что в варианте «жидкий электролитный катод – медный анод» высокочастотные пульсации тока со значительной амплитудой происходят на фоне поступления электродных материалов (электролита и меди) в разрядную область.

Повторение опытов в варианте «жидкий электролитный катод – гафниевый анод» показало, что высокочастотные пульсации тока сохраняются, несмотря на устранение поступления материала одного из электродов, а именно, металлического анода (меди). Результаты этих опытов представлены на рис. 1 во втором ряду сверху. Здесь в спектре излучения (в правом краю второго ряда) зафиксированы насыщенные излучением атомов натрия сигналы CDD-детектора, что свидетельствует об интенсивном поступлении капелек электролита в разрядную область.

На третьем ряду рис.1 представлены результаты, полученные в варианте «медный катод – гафниевый анод». На фотографии виден зеленоватый оттенок в разрядном столбе, что свидетельствует о поступлении туда атомов меди. Наличие спектральных линий меди в спектре излучения (в правом краю ряда) подтверждает этот факт. Сравнивая спектры сигналов тока, полученных в данном варианте и в предыдущих вариантах, можно увидеть, что пульсации тока усилились. Такой результат можно объяснить более интенсивным поступлением атомов меди в разрядную область. Это предположение подтверждается усилением спектральных линий меди спектре излучения.

В последнем (нижнем) ряду рис. 1 приведены результаты, полученные в варианте «гафниевый катод – гафниевый анод». В этом варианте осциллографом зафиксировались очень слабые пульсации, практически не различимые от шумовых сигналов. В спектре излучения в выбранном диапазоне длин волн зарегистрировались только спектральные линии от «следов» натрия. В опытах заметная эрозия гафниевых электродов не наблюдалась. Следовательно, поступление материала электродов в разрядную область практически отсутствовала. Таким образом, подводя итог, можно сделать заключение, что высокочастотные пульсации тока возникают при интенсивном поступлении материалов электродов в разрядную область.

Распыление жидкого электролитного катода усиливается при повышении тока. Однако в таких режимах горения электролит нагревается и требуется его вынужденное охлаждение. Один из способов съема тепла от электролита технически реализован в работе [11].

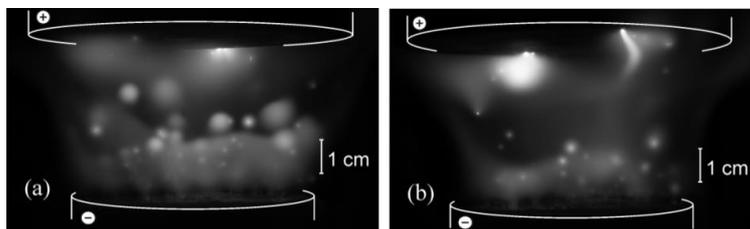


Рис. 2. Моментальные фотографии газового разряда. Катод – водный раствор NaCl, анод – медь.

На рис. 2 приведены фотографии разряда между проточным электролитным катодом и медным охлаждаемым анодом, полученные с использованием технической системы [11]. Кадры сняты 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. Ток разряда  $\langle I \rangle = 5,5$  А. Межэлектродное расстояние равно 5 см. 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. Зеленая окраска на фотографиях указывает на поступление в разрядный промежуток продуктов эрозии медного анода.

### 3. Заключение

Основной причиной возникновения высокочастотных пульсаций тока в электрических разрядах, контактирующих с жидкими электролитами, является распыление электролита и поступление капелек в разрядную область. В результате резкой тепловой деструкции жидких 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. Наугольных К. А., Рой Н. А. Электрические разряды в воде. – М.: Наука, 1971.
2. Ахметов Н.Д., Гимадеев М.М., Друлис В.Н., Кривошеев В.А. // Изв. вузов. Авиационная техника. 2011. № 1. С. 77.
3. Kashapov L.N., Kashapov N.F., Kashapov R.N. J. Phys.: Conf. Ser. 2013. V. 479. P. 012003.
4. Максимов А. И., Хлюстова А. В. // Прикладная физика. 2012. № 5. С. 62.
5. Тазмеев А. Х., Фридланд С. В., Мифтахов М. Н. // Вестник Казанского Технологического Университета. 2006. №6. С. 43.
6. Samukawa S., Hori M., Rauf S. et al. // Phys. D: Appl. Phys. 2012. V. 45. № 25. P. 253001.
7. Park S., Yoon S., Kim G. / Proc. ISPC 19. 2009. Bochum, Germany. P. 647.
8. Fujita H., Kanazawa S., Ohtani K., Komiya A., Sato T. / Proc. ISPC 21. 2013. Queensland, Australia. P. 422.
9. Кирко Д. Л., Савелов А. С., Визгалов И. В. // Вестник Казанского Технологического Университета. 2011. № 15. С. 86.
10. Тазмеев Х. К., Арсланов И. М., Тазмеев Г. Х. // Известия вузов. Физика. 2014. Т. 57. № 3-2. С. 227.
11. Tazmееv Kh. K., Tazmееv A. Kh. // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. V. 567. P. 012035.