

УДК 537.523.9

## О ПРИРОДЕ КОЛЕБАНИЙ ТОКА В ГАЗОВОМ РАЗРЯДЕ С ЖИДКИМ ЭЛЕКТРОЛИТНЫМ КАТОДОМ

Х.К. Тазмеев, И.М. Арсланов, Г.Х. Тазмеев

Исследованы колебания тока в газовом разряде с жидким электролитным катодом и анализированы причины их возникновения. Исследования проведены в диапазоне токов 4–21 А при межэлектродных расстояниях 5–15 см для различных вариантов конструктивного исполнения катодного узла.

**Ключевые слова:** газовый разряд, жидкий электрод, электролитный катод, колебания тока.

### Введение

Газоразрядные устройства с жидкофазными электродами являются динамическими системами, в которых могут возникнуть различные виды колебаний. В частности, под воздействием газового разряда может образоваться регулярная рябь на поверхности электролитного катода [1] или анода [2]. При определенных условиях разряд с жидким катодом переходит в автоколебательный режим [3]. Высокочастотные колебания тока и напряжения обнаружены в разряде, горящем между двумя жидкими электродами [4]. В данной статье излагаются результаты осциллографических исследований электрических характеристик газового разряда с жидким электролитным катодом в широких диапазонах изменения тока и межэлектродного расстояния.

### Эксперимент

Опыты проводились на установке, представленной на рис. 1.

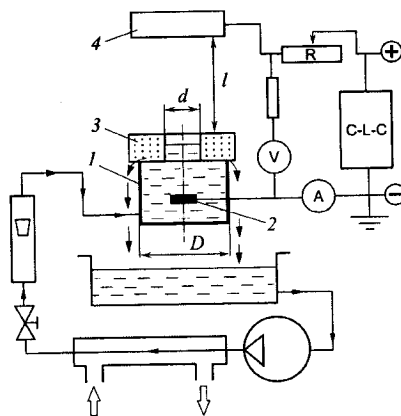


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки. Стрелками указано направление движения электролита

Электролит вытекал из вертикального цилиндрического канала 1, внутри которого был смонтирован графитовый токоподвод 2. На выходном торце цилиндрического канала 1 устанавливалась пластина 3 из огнеупорного пористого материала, выполненная в виде шайбы. Разряд горел в воздушном пространстве между электролитом и размещенным над ним металлическим электродом-анодом 4.

В качестве электролита использовались водные растворы поваренной соли с удельной электрической проводимостью  $\sigma = (1,5 \dots 2,0) \text{ См/м}$ . Источником питания служил трехфазный двухполупериодный выпрямитель. Пульсации напряжения сглаживались П-образным фильтром. Ток менялся ступенчатым варьированием балластного сопротивления, подключенного в цепь питания. Для измерения тока исполь-

зовался стрелочный прибор М2015 класса точности 0,2. Напряжение  $U$  между графитовым токоподводом 2 и анодом 4 измерялось такого же класса точности прибором М2016, к которому присоединялось добавочное сопротивление. Для фотографирования разряда использовалась скоростная камера ВИДЕОСКАН-415. Осциллограммы записывались двухлучевым запоминающим осциллографом АКИП-15/1. Изучение частотного спектра колебаний проводилось при помощи осциллографа в режиме быстрого преобразования Фурье (БПФ) с усреднением последовательных записей осциллограмм в разных вариантах. Предварительно были определены характеристики шумов в системе «источник питания – газоразрядный узел». При этом с целью более полного охвата возможных возбудителей шумовых сигналов газоразрядный узел подсоединялся к системам циркуляции электролита и охлаждения, находящихся в рабочих режимах.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 2 приведены осциллограммы тока и напряжения с разверткой в миллисекундах для разных вариантов исполнения катодного узла при различных токах и межэлектродных расстояниях  $l$ . Как видим, во всех случаях присутствуют нерегулярные низкочастотные колебания тока. В случае свободной поверхности электролита они явно происходят в противофазе колебаниям напряжения (см. рис. 2, а, б, в). Согласно закону Ома такая взаимосвязь между током и напряжением может устанавливаться из-за изменения электрического сопротивления газового разряда.

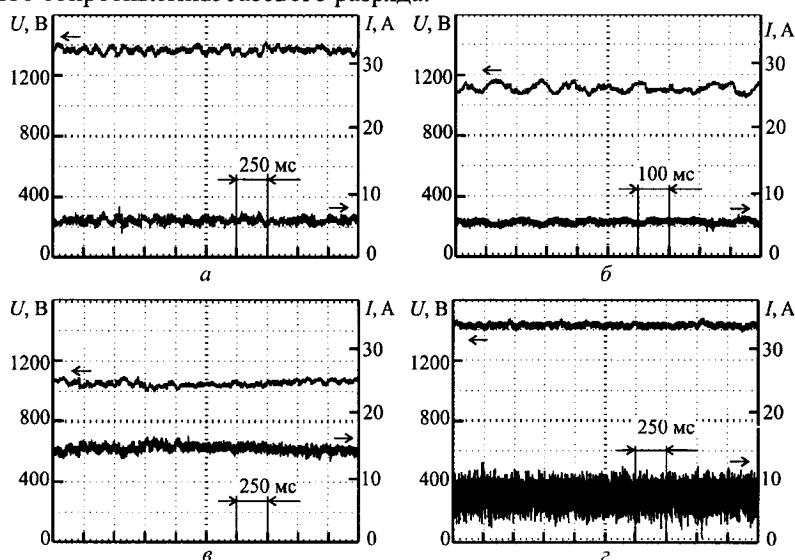


Рис. 2. Осциллограммы токов и напряжений: а –  $D = 20$  мм,  $l = 10$  см; б –  $D = 75$ ,  $l = 10$ ; в –  $D = 75$ ,  $l = 5$ ; з –  $d = 23$  мм,  $l = 10$  см

Наиболее вероятной причиной возникновения низкочастотных колебаний электрических параметров газового разряда является изменчивость формы и размеров плазменного столба. Такое свойство газового разряда отчетливо наблюдается на его мгновенных фотоснимках (рис. 3). Движущийся электролит непрерывно перемещает зону привязки разряда. При этом случайным образом меняются геометрия разряда и его пространственное положение. Поскольку столб плазмы газового разряда является проводником, при его деформировании происходит изменение электрического сопротивления, которое, в свою очередь, приводит к изменениям тока и напряжения.

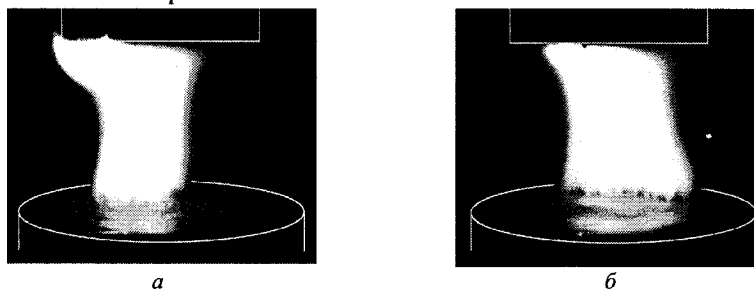


Рис. 3. Фотографии газового разряда. Экспозиция 196 мкс. Белыми линиями обозначены внешние очертания анода и стенки канала, из которого истекает электролит.  $D = 75$  мм,  $l = 5$  см,  $I = 4$  А,  $U = 840$  В

Визуальные наблюдения показали, что под воздействием газового разряда на поверхности электролита возникают волнения. Они хорошо заметны в варианте катода с широкой рабочей поверхностью. По-видимому, такие волнения служат причиной появления плавных медленных изменений тока и напряжения. Интервал времени, в котором происходят подобные процессы, зафиксирован на осциллограмме, представленной на рис. 2, в.

Существенно влияет на ток и напряжение принудительное ограничение площади зоны привязки разряда к электролиту с помощью пористой огнеупорной пластины (см. рис. 2, з). В этом случае амплитуда низкочастотных колебаний напряжения становится пренебрежимо малой по сравнению с его номинальным значением.

Осциллограммы, записанные с разверткой в наносекундах, явно демонстрируют наличие высокочастотных колебаний тока (рис. 4). Амплитуда таких колебаний сравнима со средним значением тока  $\langle I \rangle$  и в значительной степени зависит от конструктивного исполнения катодного узла, что отчетливо видно из сравнения осциллограмм тока, приведенных на рис. 4. В случае катода со свободной поверхностью электролита максимальная амплитуда составила порядка 10 % от  $\langle I \rangle$ , а при наличии ограничительной пористой пластины она достигала 35 %. Анализ колебаний с использованием режима БПФ осциллографа показал, что в обоих вариантах конструктивного исполнения катодного узла частота колебаний находится в интервале от 3 до 15 МГц.

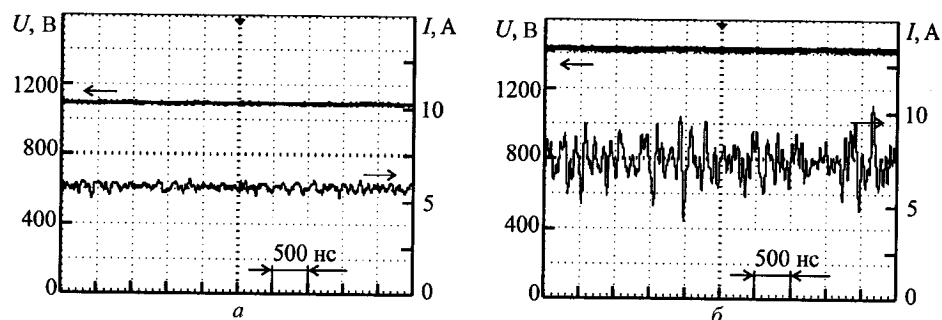


Рис. 4. Осциллограммы токов и напряжений.  $l = 10$  см: а – электролит истекает из цилиндрического канала с диаметром  $D = 75$  мм; б – на выходе канала установлена пористая пластина с отверстием  $d = 23$  мм

Фотографирование с помощью скоростной видеокамеры с малой экспозицией выявило неоднородную структуру зоны привязки разряда к электролиту. На фотографиях отчетливо проявилось, что привязка разряда к электролиту является многоточечной, причем, очень динамичной. Количество точек привязки непрерывно меняется, одни из них исчезают, другие возникают. Очевидно, что разрядный ток складывается из микротоков, проходящих через отдельные точки привязки. Поскольку микротоки быстро меняются случайным образом, возникают пульсации суммарного разрядного тока. По всей вероятности в этом заключается основная причина возникновения высокочастотных колебаний тока.

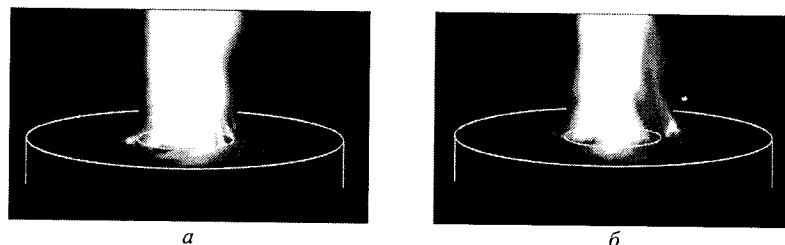


Рис. 5. Мгновенные фотографии прикатодной области плазменного столба. Белыми линиями обозначены очертания пористой пластины. Экспозиция 67 мкс. Интервал между кадрами 125 мс,  $d = 23$  мм,  $\langle I \rangle = 6$  А

Наличие на поверхности электролита пористой пластины осложняет условия формирования зоны привязки разряда. Как видно из рис. 5, точки привязки возникают и на влажной поверхности пластины. На рис. 5, а их количество больше по сравнению с рис. 5, б. По-видимому, из-за быстротечного изменения количества точек привязки усиливаются пульсации тока.

## Выводы

1. Выявлено образование низкочастотных и высокочастотных колебаний тока в газовом разряде с жидким электролитным катодом.
2. Низкочастотные колебания тока вызваны изменением геометрии плазменного столба газового разряда.
3. Наличие высокочастотных колебаний обусловлено тем, что привязка газового разряда к жидкому электролиту является многоточечной и динамичной.
4. Колебания тока в мегагерцовом диапазоне являются неотъемлемым свойством газового разряда с жидким электролитным катодом.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вялых Д.В., Дубинов А.Е., Михеев К.Е. и др. Устойчивость границы раздела «жидкий электролит – плазма тлеющего разряда» // Химическая физика. 2005. Т. 24. № 8. С. 96–98.
2. Гайсин А.Ф., Сон Э.Е. Об особенностях многоканального разряда с твердым и электролитическими электродами при атмосферном давлении // ТВТ. 2007. Т. 45. № 2. С. 316–317.
3. Петров Г.П., Сальянов Ф.А., Меркурьев Г.А. Исследование разряда с жидким катодом // Труды КАИ. 1974. Вып. 173. С. 11–15.
4. Tazmeev B.Kh., Khairullin A.Kh. High voltage discharge between two fluids (upto 2 kW) // Fifth European Conference on Thermal Plasma Processes. St. Petersburg, 1998. 13-16 July. P. 63.

Поступила в редколлегию 12.04.13

## THE NATURE OF THE CURRENT OSCILLATIONS IN THE GAS DISCHARGE WITH LIQUID ELECTROLYTE CATHODE

Kh.K. Tazmeev, I.M. Arslanov, and G.Kh. Tazmeev

Researched current oscillations in the gas discharge with liquid electrolyte cathode and analyzed their causes. Studies conducted in the current range 4–21 A at interelectrode distances of 5–15 cm for different variants of embodiment of cathode assembly.

**Keywords:** gas discharge, liquid electrode, electrolytic cathode, oscillating current.

---

**Тазмеев Харис Каюмович** – канд. техн. наук (Филиал КНИТУ-КАИ, Набережные Челны)  
E-mail: tazmeevh@mail.ru

**Арсланов Ильяс Миргарифович** – ст. преподаватель (Филиал КНИТУ-КАИ, Набережные Челны)  
E-mail: tazmeevh@mail.ru

**Тазмеев Гаяз Харисович** – студент (Филиал КНИТУ-КАИ, Набережные Челны)  
E-mail: tazmeevh@mail.ru