

Ал. Ф. Гайсин, И. Ш. Абдуллин, Р. М. Хазиев,
Л. Ш. Гасимова, Г. Т. Самитова

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ЕМКОСТНОЙ РАЗРЯД МЕЖДУ МЕДНОЙ ТРУБКОЙ И ПОВЕРХНОСТЬЮ ЭЛЕКТРОЛИТА

Ключевые слова: высокочастотный емкостной разряд, электролит, медная трубка, разряд, струя, электрод.

Представлены результаты экспериментального исследования высокочастотного емкостного разряда (ВЧЕР) между медной трубкой и поверхностью электролита (техническая вода) в атмосфере воздуха. Установлено, что при пониженном давлении (2,4 кПа) в случае непроточного электролита горит слаботочный ВЧЕР с нормальной плотностью тока на поверхности электролита. Выявлено, что при повышенных давлениях ($P = 13,3$ кПа) и больших межэлектродных расстояниях сплошное пятно на поверхности электролита расщепляется и происходит переход в высокочастотный емкостной многоканальный разряд. Обсуждается механизм горения высокочастотного емкостного многоканального разряда с электролитическим электродом.

Keywords: high frequency capacitance discharge, electrolyte, copper tube, discharge, jet, electrode.

Presented are the results of experimental investigation of high frequency capacitance discharge (HFCD) between a copper tube and electrolyte (tap water) surface in air. It is established that at lower pressures (2,4 kPa) there occurs an HFCD with normal current density at the electrolyte surface. It is found that at higher pressures (13,3 kPa) and large inter-electrode distances the continuous spot on the electrolyte surface splits to small ones and the discharge transforms to a multichannel HFCD. The mechanisms of burning of the high frequency capacitance multichannel discharge with an electrolyte electrode are discussed.

Введение

Высокочастотная плазма ВЧЕР пониженного давления между твердыми электродами широко используется для модификации поверхности материалов органической и неорганической природы. ВЧЕР позволяет проводить очистку, полировку поверхности, нанесение тонкопленочных покрытий, упрочнение поверхностного слоя, повышение усталостной прочности, износостойкости и срока службы материалов и изделий [1, 2].

Основы современной физики ВЧЕР между твердыми электродами изложены в [3, 4 и др.]. В настоящее время большое количество экспериментальных работ посвящено исследованию характеристик электрических разрядов постоянного тока в жидкости и в газах с жидкими электродами [5-8]. Однако экспериментальных данных высокочастотных емкостных разрядов с жидкими электродами очень мало. Из анализа немногочисленных экспериментальных работ следует, что исследования ВЧЕР с жидкими электродами приведут к новым научным результатам и откроют новые технологические возможности [9]. Неравновесная плазма ВЧЕР с жидкими электродами более сложна, чем плазма электрических разрядов постоянного тока. Существенная сложность плазмы ВЧЕР означает, что фундаментальное понимание их физики остается пока недоступным. Основной причиной является ограничение числа подходящих для диагностики методов.

Целью данной работы является экспериментальные исследования формы и структуры ВЧЕР между медной трубкой и поверхностью электролита в широком диапазоне параметров.

Экспериментальная установка и методики исследований

Краткое описание экспериментальной установки для исследования ВЧЕР с капельно-

струйными электролитами приведено [9]. Отличительной особенностью установки для исследования ВЧЕР между медной трубкой и непроточным электролитом является то, что напряжение на электродах определялось с помощью емкостного делителя напряжения вольтметра ВУ и изменялось от 2 до 5 кВ. Ток в контуре измерялся поясом Роговского. Электрический пробой между водоохлаждаемой медной трубкой и поверхностью электролита происходил без дополнительного «поджигающего электрода». В данном случае медная пластина в электролите была заземлена, а верхний твердый электрод присоединялся к другой пластине. Некоторые режимы запуска: ВЧГЧ-10/0,44, $l = 4$ мм, $U = 3,4$ кВ, $I = 2,7$ А и $l = 7$ мм, $U = 5$ кВ, $I = 5$ А. Площади пятен определялись путем измерения их диаметров с помощью микроскопа СП-52 с погрешностью $\pm 0,05$ мм.

Экспериментальные исследования ВЧЕР между медной трубкой и непроточным электролитом проводились в диапазоне $P = 2,4-100$ кПа. Структуры и фотографии ВЧЕР представлены на рис. 1. При средних давлениях $P = 2,4$ кПа между электролитическим и металлическим электродами (структура рис. 1а) наблюдается диффузный, слаботочный ВЧЕР, который чуть заметен на поверхности твердого электрода (рис. 1а). Сплошное пятно на поверхности электролита (техническая вода) имеет слабый синий цвет. С ростом давления от 2,4 до 2,7 кПа появляется плазменный столб (ПС) слабо синего цвета. Диаметр пятна на поверхности электролита при $P = 2,7$ кПа, $I = 0,8$ А равен 20 мм. Плотность тока на электролите совпадает с нормальной плотностью тока. С дальнейшим ростом тока при $P = 2,7$ кПа, $I = 25$ мм происходят структурные изменения ВЧЕР между электролитическим и металлическим электродами. Если при малых токах разряд отрывается от поверхности электролита (структуры рис. 1б и б'). С ростом тока разряда до 1000 мА в межэлек-

тродном промежутке образуется ПС. Основание конуса на поверхности электролита шире, чем вблизи металлического электрода. Плазменный столб имеет фиолетовый цвет. С ростом тока и давления диаметр ПС уменьшается вблизи металлического электрода, а у электролита расширяется. С дальнейшим ростом давления от 2,7 до 13,3 кПа и при больших $l = 25$ мм происходит расщепление ПС вблизи электролита, а на его поверхности появляются распределенные пятна. При атмосферном давлении их размеры существенно уменьшаются, и распределенные пятна становятся почти точечными (структура рис. 1в) на поверхности электролита.

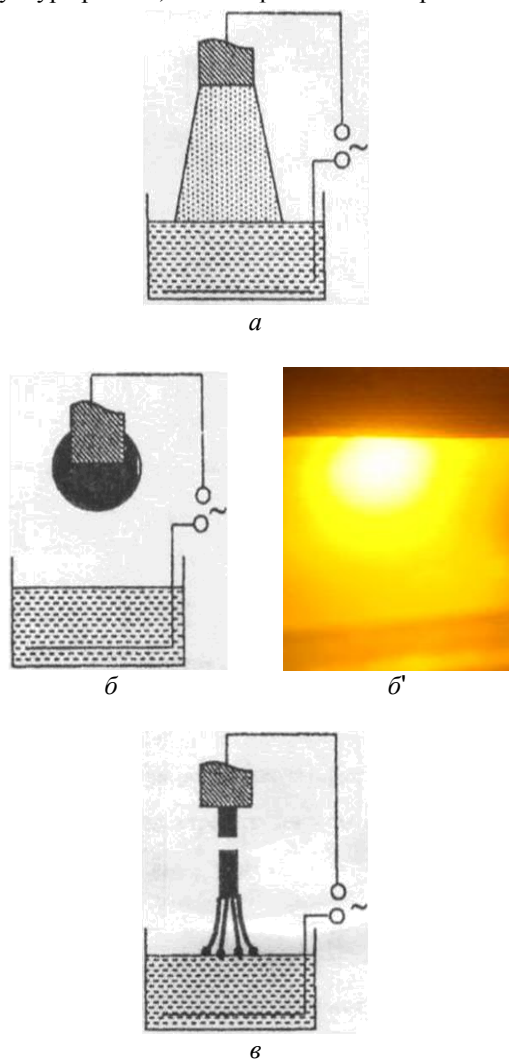


Рис. 1 - Структуры ВЧЕ (а-в) паровоздушного разряда между медной трубкой и поверхностью непроточного электролита: а) $P = 2,4$ кПа; б, б') $P = 2,7$ кПа; в) $P = 10^5$ Па

Экспериментально установлено, что ВЧЕР между твердыми электродами горят в одной из двух сильно различающихся форм [3]. Внешне отличаются характером распределения интенсивности свечения вдоль межэлектродного промежутка, а по существу – процессами в приэлектродных слоях и механизмами замыкания тока на электроды [4]. При сильноточном разряде возникает диффузионное свечение в середине промежутка, а около электро-

дов газ не светится. Анализ ВЧЕР между медной трубкой и непроточным электролитом (техническая вода), показал, что при средних давлениях горит слаботочный разряд с нормальной плотностью тока. Однако с ростом тока и давления ВЧЕР между медной трубкой и непроточным электролитом отличается от высокочастотного емкостного разряда между твердыми электродами ВЧЕР становится многоканальным с точечными пятнами на поверхности электролита (рис. 1в).

Механизм горения многоканального ВЧЕР между медной трубкой и непроточным электролитом объясняется тем, что электролит является системой с распределенными параметрами. С увеличением давления и тока разряда геометрические размеры ПС и пятна на поверхности электролита уменьшаются, и сопротивление канала возрастает. Поэтому появляются дополнительные каналы для пропускания большего тока. Многоканальный разряд можно рассмотреть как систему, состоящую из параллельно соединенных каналов. Увеличение числа каналов не приводит к росту полного сопротивления в электролите. Перераспределение плотности тока на поверхности электролита приводит к образованию распределенных пятен и горению многоканального ВЧЕР между медной трубкой и непроточным электролитом.

Заключение

1. Экспериментально исследованы структуры ВЧЕР между непроточным электролитическим и металлическим электродами в широком диапазоне давления (10^3 - 10^5 Па), тока и межэлектродного расстояния. Установлено, что при пониженном давлении (2,5 кПа) между непроточным электролитическим и металлическим электродами наблюдается слаботочный ВЧЕР с нормальной плотностью тока на электролитическом электроде.

2. Показано, что с ростом давления появляется плазменный столб слаботочного ВЧЕР, который при малых токах отрывается от поверхности электролита. При повышенных давлениях ($P = 13,3$ кПа) и больших межэлектродных расстояниях сплошное пятно на поверхности электролита расщепляется и происходит переход в высокочастотный емкостной многоканальный разряд. Обсуждается механизм горения высокочастотного емкостного многоканального разряда с электролитическим электродом.

3. Установлено, что высокочастотный емкостной разряд с сплошным пятном на поверхности электролита горит более устойчиво в широком диапазоне параметров (l и P) по сравнению с ВЧЕР постоянного тока между металлическими электродами.

Литература

1. Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Сагбиев И.Р., Шаехов М.Ф. *Модификация нанослоев в высокочастотной плазме пониженного давления*. Казань: Казан. гос. техн. ун-т, 2007. 354 с.
2. Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кашапов Н.Ф. *Высокочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях. Теория и практика применения*. Казань: Казан. гос. техн. ун-т, 2000. 348 с.

3. Райзер Ю.П. *Основы современной физики газоразрядных процессов*. М.: Наука, 1980. 414 с.
4. Райзер Ю.П. *Физика газового разряда*. М.: Наука, 1987. 588 с.
5. Bruggman P, Chryphe L. *Нетермические плазмы в жидкостях и контактирующие с жидкостями: обзорная работа* J. Phys.D: Appl.Phys.42 (2009)053001 (28pp).
6. Гайсин А.Ф., Абдуллин И.Ш. *Особенности высокочастотного емкостного разряда (ВЧЕР) при пониженных давлениях с металлическим электродом, погруженным в электролит* // Вестник Казан. технол. ун-та. 2013. № 19. С. 301-304.
7. Садриев Р.Ш., Гайсин Ал.Ф., Гайсин Аз.Ф., Басыров Р.Ш., Гайсин Ф.М. *Особенности высокочастотного разряда между твердым и электролитическим электродами* // Вестник Казан. технол. ун-та. 2013. № 23. С. 216-218.
8. Гайсин Ал.Ф. *Электрические разряды вдоль струи электролита* // Вестник Казан. технол. ун-та. 2013. №19. С. 307-310.
9. Гайсин А.Ф. *Некоторые особенности развития высокочастотного емкостного разряда (ВЧЕР) между капельно-струйным электролитическим электродом и проточной электролитической ячейкой* // Теплофизика высоких температур. 2013. Т. 51. № 6.

© **Ал. Ф. Гайсин** – канд. техн. наук, доц. каф. технической физики КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева, almaz87@mail.ru; **И. Ш. Абдуллин** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. плазмохимических и нанотехнологий высокомолекулярных материалов КНИТУ, abdullin_i@kstu.ru; **Р. М. Хазиев** – канд. техн. наук, доц. каф. технической физики КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева; **Л. Ш. Гасимова** - вед. инженер той же кафедры; **Г. Т. Самитова** – канд. техн. наук, зам. дир. по общим вопросам Зеленодольский институт машиностроения и информационных технологий (филиал) КНИТУ-КАИ.