

УДК 537.528

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЗОНЕ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА МЕЖДУ ЖИДКИМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Ал. Ф. Гайсин, Н. Ф. Кашапов*

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А. Н. Туполева — Казанский авиационный институт, 420111 Казань, Россия

* Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420021 Казань, Россия
E-mails: almaz87@mail.ru, Nail.Kashapov@kpfu.ru

Исследованы электрофизические, гидрогазодинамические и тепловые характеристики разряда, возникающего между жидкими электродами. С использованием шпирен-метода осуществлена пространственная визуализация картин течения в зоне газового разряда.

Ключевые слова: газовый разряд, жидкие электроды, струйно-капельный режим течения, шпирен-метод.

DOI: 10.15372/PMTF20180403

Наряду с исследованиями разрядов между твердыми электродами большой интерес представляет исследование газовых разрядов между жидкими электродами [1–8].

Целью настоящей работы является экспериментальное изучение электрофизических, гидрогазодинамических и тепловых характеристик разряда между жидкими электродами.

Исследовались разряды, возникающие между металлическим анодом и жидким катодом, струйно-капельным катодом и металлическим анодом, струйно-капельным катодом и жидким анодом (рис. 1), при следующих параметрах: напряжение $U = 200 \div 1000$ В, давление внешней среды $p = 10^5$ Па, удельная электропроводность электролита $\sigma = 0,10 \div 0,12$ Ом⁻¹·см⁻¹, скорость течения струи $v = 0,1 \div 0,4$ м/с, межэлектродное расстояние $d = 0 \div 2$ мм, длина струи $l = 5 \div 10$ мм. В качестве электролита использовался 7 %-й раствор NaCl в технической воде, в качестве твердого электрода — медный стержень диаметром $d_c = 1,5$ мм и медная пластина $d_{\text{п}} = 1$ мм.

Из рис. 2, на котором приведены осциллограммы напряжения и силы тока в разряде между металлическим анодом и жидким катодом, следует, что при постоянном значении напряжения $U = 400$ В разряд возникает в виде импульсов с частотой $\nu \approx 40 \div 400$ Гц, длительностью $\tau_l \approx 2$ мс, сила тока меняется в диапазоне $I = 0,4 \div 0,8$ А. При увеличении напряжения U до 700 В частота пульсаций уменьшается до значений $\nu \approx 20 \div 30$ Гц, сила тока микроразрядов увеличивается с 2 до 11 А, мощность P разряда — приблизительно с 0,2 до 8,0 кВт.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Республики Татарстан (код проекта 18-42-160004), а также Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 18-32-00033).

© Гайсин Ал. Ф., Кашапов Н. Ф., 2018

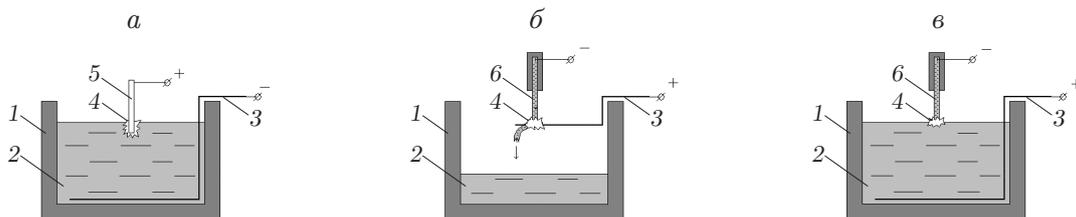


Рис. 1. Схема установки:

a — металлический анод — жидкий катод, *б* — струйно-капельный катод — металлический анод, *в* — струйно-капельный катод — жидкий анод; 1 — электролитическая ячейка, 2 — электролит, 3 — пластина для подвода отрицательного потенциала, 4 — область с разрядом, 5 — металлический катод, 6 — жидкий анод

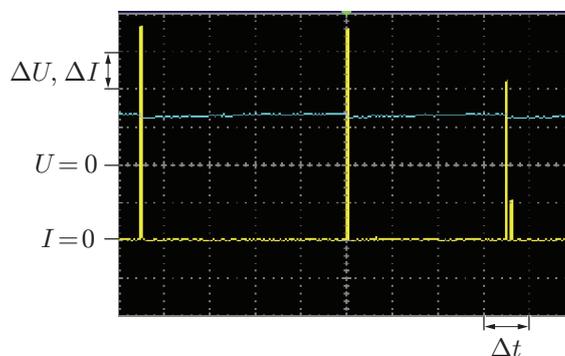


Рис. 2. Осциллограммы силы тока и напряжения газового разряда ($\Delta U = 500$ В, $\Delta I = 2$ А, $\Delta t = 10$ мс)

Между струйно-капельным катодом и металлическим анодом при напряжении $U = 600$ В разряд возникает в виде коротких импульсов с силой тока $I = 0,4 \div 1,6$ А, частотой пульсаций $\nu = 100 \div 200$ Гц. При увеличении напряжения до значения $U = 1000$ В частота пульсаций тока уменьшается до $40 \div 50$ Гц, сила тока меняется в диапазоне $I = 2,2 \div 2,8$ А, мощность равна $P \approx 0,1 \div 2,8$ кВт, продолжительность импульсов тока составляет $\tau_I \approx 2,5 \div 5,0$ мс.

Возникновение разряда между струйно-капельным катодом и жидким анодом при напряжении $U = 600$ В приводит к появлению “широких” импульсов с силой тока $I = 0,6 \div 2,0$ А, частотой $\nu \approx 20 \div 30$ Гц. При увеличении напряжения до 900 В частота пульсаций меняется в диапазоне $\nu = 30 \div 40$ Гц, сила тока — в диапазоне $I = 0,6 \div 2,0$ А, мощность разряда $P \approx 0,4 \div 1,8$ кВт.

Из рис. 3, на котором показаны распределение и поле температуры поверхности электродов в области газового разряда, следует, что поверхность металлического анода нагревается до температуры $T_a \approx 373$ °С, а температура газа вблизи металлического анода достигает значения $T_p \approx 200$ °С. Это соответствует области высокой плотности и температуры. Температура струйно-капельного катода меняется от значения 28 °С в области истечения струи до 124 °С в области разряда.

При визуализации области разряда (рис. 4) видно, что формирование микрозарядов сопровождается интенсивным испарением электролита и деформацией поверхности жидкого электрода с образованием капель различного диаметра. При подаче напряжения в цепи возникает постоянный ток и в результате тепловыделения на границе между ме-

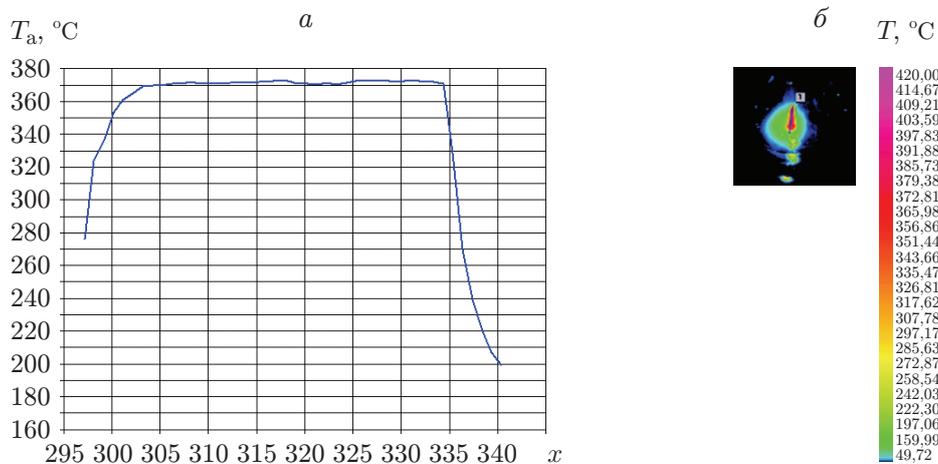


Рис. 3. Распределение (а) и поле (б) температуры поверхности электродов в области газового разряда



Рис. 4. Шлирен-фотография области газового разряда (темный цвет — ударные волны, белый — волны разрежения)

таллическим анодом и жидким катодом образуется парогазовая оболочка. В случае если мощность достаточна для ионизации, в парогазовой оболочке возникает пробой, вследствие чего давление в ней резко увеличивается. Это приводит к возникновению процесса, аналогичного “гидроудару” с характерным акустическим хлопком и образованием ударных волн, которые распространяются в различных направлениях от металлического электрода. Под действием ударных волн жидкий катод деформируется и отталкивается от металлического анода. Вследствие этого межэлектродное расстояние возрастает, сопротивление увеличивается, разряд ослабевает, сила тока уменьшается до нуля и тепловыделение в окрестности металлического анода уменьшается. Далее парогазовая оболочка “схлопывается” и жидкость соприкасается с поверхностью сильно нагретого ($T_a \approx 373$ °C) металлического анода, что приводит к резкому локальному тепловыделению с образованием парогазовой оболочки и повторным пробоем. Данный процесс повторяется с частотой $\nu \approx 20 \div 400$ Гц.

Исследован процесс возникновения газового разряда между жидкими электродами, представляющего собой импульсные микроразряды с мощностью $P \approx 0,1 \div 8,0$ кВт, частотой пульсаций $\nu \approx 20 \div 400$ Гц и силой тока $I \approx 0,4 \div 11,0$ А.

Изучены характеристики протекания разряда для систем: металлический анод — жидкий катод, струйно-капельный катод — металлический анод, струйно-капельный катод — жидкий анод.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Акишев Ю. С., Грушин М. Е., Каральник В. Б. и др.** Создание неравновесной плазмы в гетерофазных средах газ — жидкость при атмосферном давлении и демонстрация ее возможностей для стерилизации // Физика плазмы. 2006. Т. 32, № 12. С. 1142–1152.
2. **Демехин Е. А., Полянских С. В.** Устойчивость микроструи вязкой жидкости в постоянном и переменном электрическом поле // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2010. № 5. С. 49–65.
3. **Гайсин А. Ф., Басыров Р. Ш., Сон Э. Е.** Модель тлеющего разряда между электролитическим анодом и металлическим катодом // Теплофизика высоких температур. 2015. Т. 53, № 2. С. 193–197.
4. **Максимов А. И., Титов В. А., Хлюстова А. В.** Излучение тлеющего разряда с электролитным катодом и процессы переноса нейтральных и заряженных частиц из раствора в плазму // Химия высоких энергий. 2004. Т. 38, № 3. С. 227–230.
5. **Machala Z., Jedlovsky I., Chladekova L., et al.** DC discharges in atmospheric air for biodecontamination — spectroscopic methods for mechanism identification // Europ. Phys. J. D. 2009. V. 54. P. 195–204.
6. **Pongrác B., Machala Z.** Electrospraying of water with streamer corona discharge // IEEE Trans. Plasma Sci. 2011. V. 39. P. 2664–2665.
7. **Kim H. H., Teramoto Y., Negishi N., et al.** Polarity effect on the electrohydrodynamic (EHD) spray of water // J. Aerosol. Sci. 2014. V. 76. P. 98–114.
8. **Bruggeman P., Leys C.** Non-thermal plasmas in and in contact with liquids // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. V. 42. 053001.

*Поступила в редакцию 12/IV 2017 г.,
в окончательном варианте — 27/XI 2017 г.*
