

03;04;12

## Исследование устойчивости границы раздела жидкий электролит—плазма тлеющего разряда

© Д.В. Вялых, А.Е. Дубинов, К.Е. Михеев, Ю.Н. Лашманов, И.Л. Львов, С.А. Садовой, В.Д. Селемир

Российский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,  
607190 Саров, Нижегородская область, Россия  
e-mail: dubinov@ntc.vniief.ru

(Поступило в Редакцию 8 февраля 2005 г.)

Методом цифровой фоторегистрации исследовалась устойчивость границы раздела между жидким электролитом и плазмой тлеющего контрагированного разряда постоянного тока и пониженного давления. В качестве электролитов использовались водные растворы перманганата калия и медного купороса, а в качестве плазмообразующего газа тлеющего разряда — воздух. Обнаружена неустойчивость границы для перманганата калия, приводящая к выбросу электролита в плазму и гашению разряда. Обнаружены различные устойчивые режимы границы для медного купороса, которые реализуются в зависимости от величины тока разряда: гладкая граница, уединенная волна на гладкой границе, регулярная рябь, бурлящая вспененная зона турбулентного перемешивания.

Газовый разряд с поверхности электролита является одним из интереснейших объектов для исследования в прикладной плазмохимии [1–3]. Целью данной работы являлось визуальное и фотографическое исследование состояния границы между жидким электролитом и плазмой тлеющего разряда постоянного тока и пониженного давления.

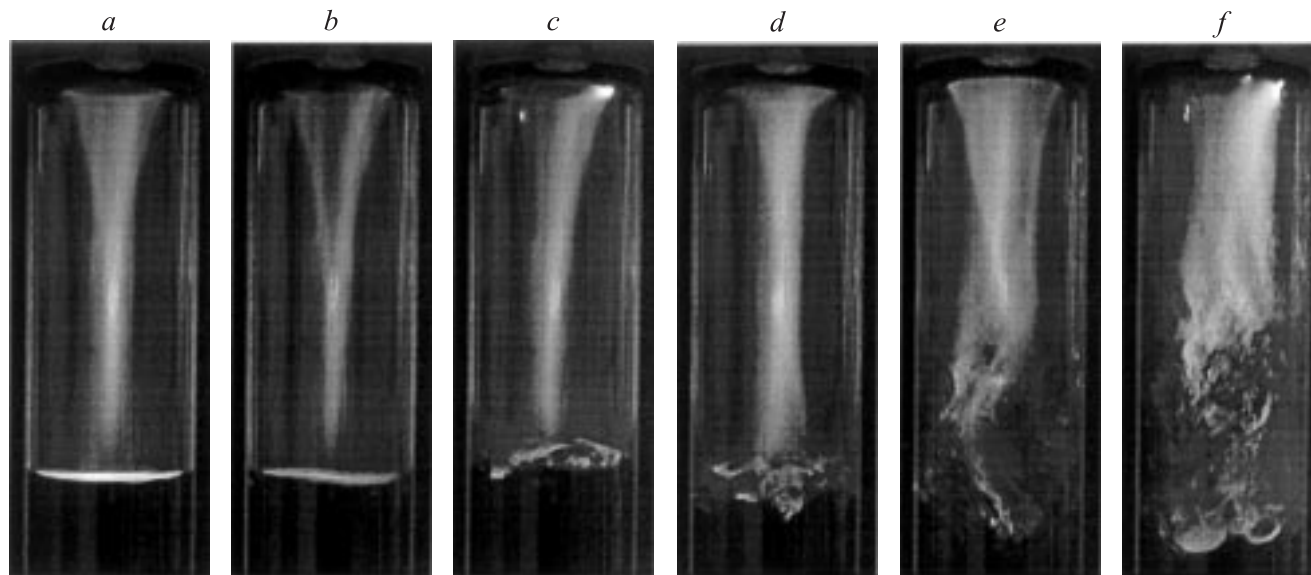
Эксперименты проводились в газоразрядной стеклянной трубке, имеющей длину 200 мм, диаметр 30 мм и установленной вертикально. На концах трубки находились электроды из нержавеющей стали, нижний электрод выполнял роль катода, а верхний — роль анода.

Трубка на высоту 130 мм заполнялась жидким электролитом. В качестве электролитов использовались водные растворы: 0.2%-ный раствор перманганата калия

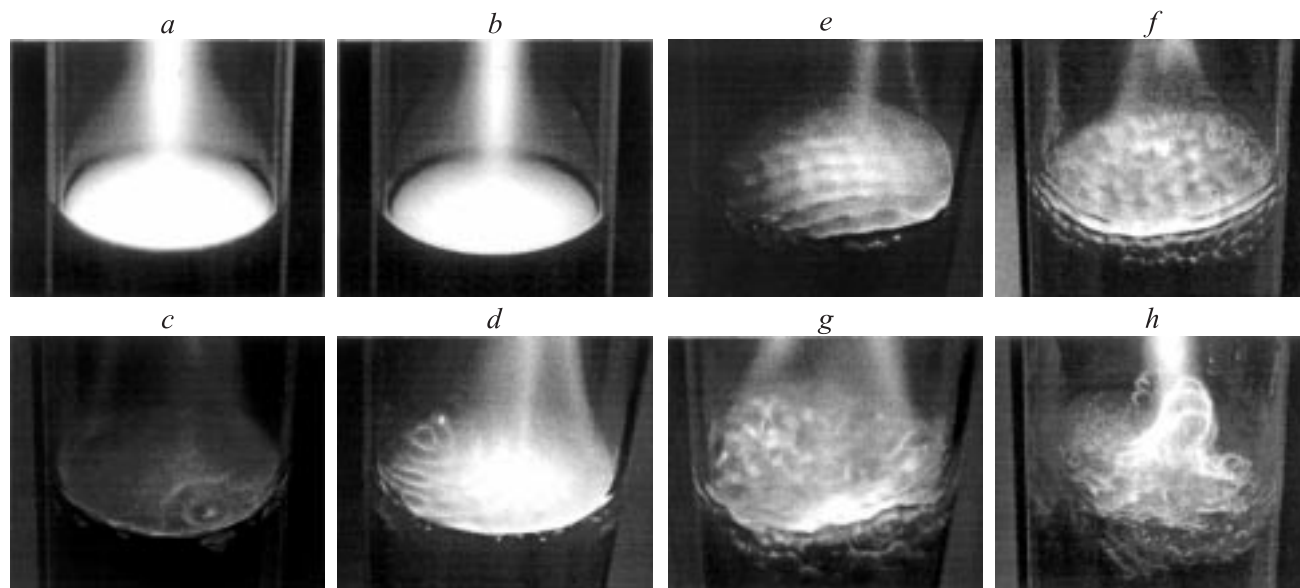
( $\text{KMnO}_4$ ), имеющий красно-коричневый цвет, и 10%-ный раствор медного купороса ( $\text{CuSO}_4$ ), имеющий голубой цвет.

Давление в оставшемся в трубке воздушном разрядном промежутке устанавливалось 40–60 Торг. Дальнейшее снижение давления может привести к интенсивному кипению электролита при комнатной температуре. Поддержание давления чуть выше порога кипения приводило к заметному насыщению разрядного промежутка парами электролита.

Для питания разряда использовался источник постоянного тока, в цепь которого включалась газоразрядная трубка. Ток, протекающий в трубке, переносился в электролите ионами, а в плазме тлеющего разряда — электронами. На границе раздела между электролитом



**Рис. 1.** Динамика горения тлеющего разряда над поверхностью перманганата калия: *a* — гладкая поверхность; *b* — искривление поверхности; *c* — волновое возмущение поверхности; *d* — рост возмущений; *e* — турбулентный выброс плазменно-электролитной смеси в зону разряда; *f* — дальнейший турбулентный выброс плазменно-электролитной смеси в зону разряда.



**Рис. 2.** Формы горения тлеющего разряда над поверхностью медного купороса: *a, b* — гладкая поверхность; *c, d* — возмущение поверхности в виде уединенной волны; *e, f* — регулярная поверхностная рябь; *g, h* — бурлящая вспененная зона турбулентного перемешивания.

и плазмой происходит смена носителей тока, представляющая собой сложный кинетический процесс. На состояние поверхности помимо кинетических процессов также оказывают влияние интенсивные акустические колебания, возникающие в электролите при протекании в них тока. Поэтому изучение границы плазма–электролит имеет важное значение для понимания процессов разряда.

Наблюдение разряда проводилось визуально и с помощью цифровой фотокамеры „Olimpus C-40ZOOM“, позволяющей получать качественные цветные фотографии различных стадий процесса, а также изучать динамику процесса с помощью кратковременной, в течение нескольких секунд, цифровой видеозаписи.

Тлеющий разряд постоянного тока при давлении 40–60 Торг является контрагированным при использовании обоих типов раствора. Однако динамика границы раздела электролита и плазмы для двух растворов различна.

Разряд над поверхностью раствора перманганата калия горел в течение 3–5 с при протекании тока разряда величиной 250 мА. За это время наблюдалось несколько стадий процесса горения. Сначала разряд горел в виде контрагированного разряда над гладкой поверхностью границы плазма–электролит. На этой стадии заметно также свечение поверхности. Затем происходило искривление границы, возбуждение интенсивных поверхностных волн, далее шло сильное турбулентное перемешивание электролита и плазмы и выбрасывание смеси в объем разряда. После достижения выбрасываемой смеси верхнего электрода разряд погасал. Нам удалось заснять на фотокамеру 6 различных стадий этого весьма динамического процесса (рис. 1, *a–f*).

Совсем другая картина наблюдается в разряде над поверхностью медного купороса. Этот разряд более спокойный, и можно без временной синхронизации зарегистрировать различные формы разряда. Эти формы отличаются различной структурой возмущения поверхности границы плазма–электролит. Были зарегистрированы следующие формы (в порядке увеличения тока разряда от 50 до 150 мА): гладкая поверхность, поверхность с возмущением в виде уединенной волны, регулярная поверхностная рябь типа волн Фарадея, бурлящая вспененная зона турбулентного перемешивания. 4 фотографии соответствуют этим формам (рис. 2, *a–h*).

Таким образом, в проведенном исследовании нам удалось впервые зарегистрировать различные по динамике и форме тлеющие разряды над поверхностью электролита.

Работа выполнена в рамках научного гранта NWO № 047-016-020.

## Список литературы

- [1] Гайсин Ф.М., Сон Э.Е. // Химия плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1990. Вып. 16. С. 120–156.
- [2] Kuzmin S., Vaculik R., Janča J. // ICPP&25<sup>th</sup>EPS Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics. ECA. 1998. Vol. 22C. P. 2651–2654.
- [3] Кутенов А.М., Захаров А.Г., Максимов А.И. Вакуумно-плазменное и плазменно-растворное модифицирование полимерных материалов. М.: Наука, 2004. 496 с.