

ИЗУЧЕНИЕ ЗОНЫ ПРИВЯЗКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА К ЖИДКОМУ КАТОДУ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИЕЙ

Г.Х. Тазмеев¹, Б.А. Тимеркаев¹, Х.К. Тазмеев²

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.

Туполева¹

Набережночелнинский институт Казанского федерального университета²

tazmееvg@mail.ru

Работа посвящена экспериментальному исследованию свойств зоны привязки газового разряда к жидкому электролитному катоду. На основе анализа данных высокоскоростной съемки выполнено детальное описание процессов на границе «плазма-жидкость». Выявлены закономерности явлений переноса вещества и электрических зарядов от жидкого электролита в плазменный столб.

Введение.

В последние годы электрические разряды с привязкой к жидкости привлекают внимание исследователей в связи с их большими потенциальными возможностями практического применения [1-4]. При наличии жидкости в приэлектродных областях происходят достаточно сложные процессы. Данная работа посвящена детальному изучению этих процессов с помощью высокоскоростной видеосъемки.

Эксперимент.

В экспериментальной практике для создания газового разряда с жидким электролитным катодом применяются различные системы электродов. В открытом воздухе при атмосферном давлении, как правило, электролит либо наливается в емкость с большим геометрическим объемом и циркулирует через него, либо истекает из трубки. В таких вариантах разряд формируется в виде тела цилиндрической формы. Вблизи его оси, образно говоря, разряд «сгущается», и пространственная структура «замазывается». В данной работе электролит истекал из щелевого зазора. При этом разряд формировался в виде вертикальной светящейся стенки сравнительно малой толщины. Благодаря этому появилась возможность более детального изучения его пространственной структуры.

Экспериментальное устройство, использованное для создания и изучения электрического разряда, схематично изображено на рис. 1.

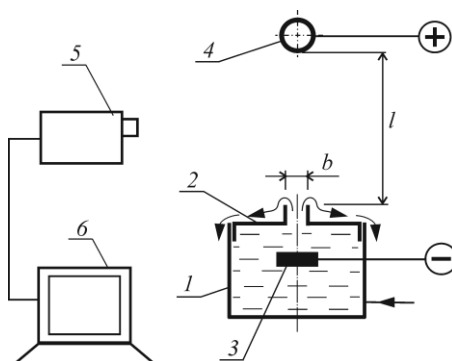


Рис. 1. Экспериментальная установка (узел электрического разряда).

Жидкий электролит подавался в цилиндрическую емкость 1. Она была закрыта крышкой 2, которая имела щелевой зазор шириной $b = 2.5$ мм. Длина щели равнялась

35 мм. На краях зазора были выполнены буртики высотой 5 мм. В качестве электролита использовался раствор хлорида натрия в дистиллированной воде. Он был приготовлен с концентрацией по массе 0.55 %. Удельная электрическая проводимость находилась в пределах 10.00 ± 0.20 мСм/см. Массовый расход электролита m через щель составлял 5-6 г/с. Внутри емкости была смонтирована графитовая пластина 3, которая подсоединялась к отрицательному полюсу источника питания. Разряд горел между электролитом и водоохлаждаемым металлическим анодом 4. Анод был выполнен в виде длинной трубки. Он был ориентирован вдоль щели и располагался над ней на расстоянии $l = 4$ см. Источником питания служил трехфазный двухполупериодный выпрямитель. Пульсации напряжения сглаживались $C-L-C$ -фильтром.

Скоростная видеосъемка производилась камерой Photron FASTCAM SA4. Ее технические характеристики позволяют детально изучить процессы в системах с жидкой средой [5]. Накопленная в видеокамере 5 информация передавалась компьютеру 6.

Результаты эксперимента и их анализ.

На рис. 2 приведены видеок cadры, полученные при режиме 10000 кадров в секунду. Как видно, ближе катоду светящийся столб расщепляется на множество каналов. Эти каналы упираются на поверхность электролита, образуя мелкие светящиеся опорные пятна.

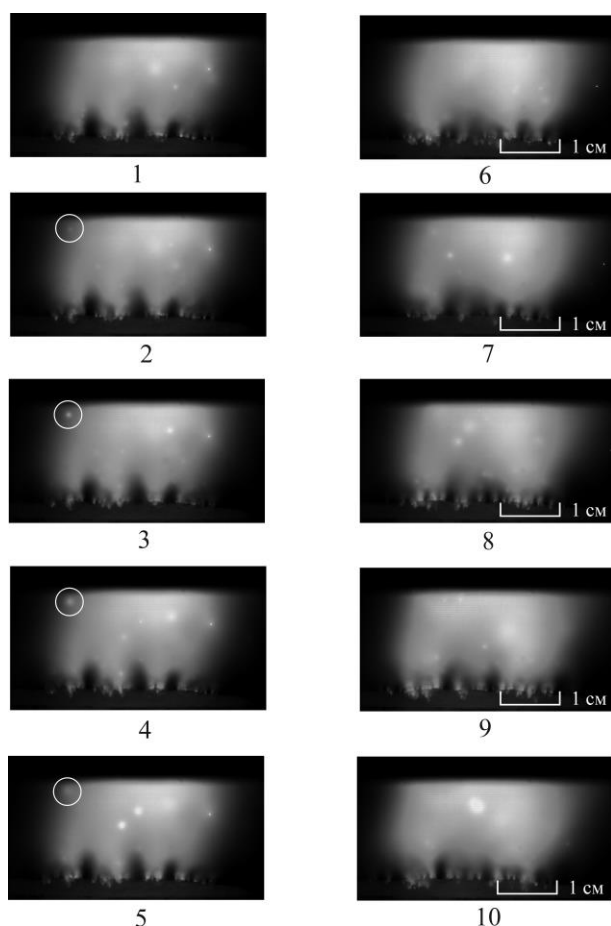


Рис. 2. Видеок cadры. Катод внизу, анод наверху и прикрыт непрозрачной пластиной. Ток 1.3 А, напряжение на клеммах 1100 В. 1, 2, 3, 4 и 5 – интервал между кадрами 10^{-4} с; 6, 7, 8, 9 и 10 – 10^{-3} с. Белым кругом выделено одно из многочисленных вспышек.

Высокоскоростная съемка позволила проследить движение опорных пятен и выявить некоторые их свойства.

1. Отдельно взятые опорные пятна существовали не долго. Одни из них появлялись и быстро исчезали, другие продержались подольше. Минимальное время жизни τ составило ~ 1 мс. Максимальное значение τ определить было затруднительно. Оно превышало 10 мс. За это время опорные пятна успевали сгруппироваться и сливались с другими, т.е. становились трудно различаемыми в видеокадре.

2. В течение времени τ яркость отдельного опорного пятна менялась. В моменты максимальной яркости пятно расширялось до наибольших размеров. Максимальное значение диаметра пятна находилось в пределах 0.15-0.25 мм.

3. Количество опорных пятен с максимальной яркостью постоянно менялось. Это происходило из-за того, что пятна возникали и исчезали, а также «сливались». Тем не менее, в каждом видеокадре их можно было сосчитать с некоторой погрешностью. В частности, при токе 1.3 А их количество составляло 35-50 штук.

4. Происходило непрерывное движение опорных пятен по поверхности электролита. Причем опорные пятна двигались намного быстрее потока электролита, что было видно визуально, и подтверждались вычислениями. Средняя скорость опорных пятен получилась ~ 1 м/с.

Результаты наблюдений были использованы для оценки плотности тока на жидком электролитном катоде по формуле $j_k = I/(N \cdot S)$, где N – количество опорных пятен, S – площадь сечения отдельного опорного пятна. Получилось, что j находится в пределах 50-100 А/см². Это на несколько порядков меньше, чем плотность тока на металлическом катоде при горении электрической дуги [6]. Однако в случае газового разряда с жидким электролитным катодом является сравнительно большой величиной по сравнению с известными данными [7-9]. Традиционно плотность тока на жидком катоде определяют как отношение силы тока на площадь светящейся области на поверхности жидкости. При малых токах, не превышающих десятки миллиампер, такой метод является приемлемым, поскольку неоднородность зоны привязки не наблюдается, по крайней мере, не обнаруживается при визуальном осмотре. Числовое значение j_k получается ~ 1 А/см² [8]. При токах более 1 А неоднородность зоны привязки разряда к жидкому катоду становится явной. Примечательно то, что в этих условиях вычисления по традиционному методу дают такой же результат [9].

Еще одно свойство электрического разряда, которое отчетливо проявилось в исследованиях высокоскоростной съемкой – это появление вспышек. На видеокадрах они выделялись в виде ярких кружочков с разными диаметрами (рис. 2). Они увеличивались и становились менее заметными. Продолжительность их существования составляла десятые доли миллисекунды.

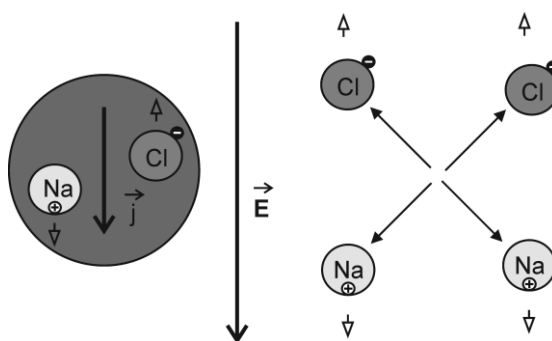


Рис. 3. Капля электролита в электрическом поле плазменного столба до и после взрыва.

Можно считать, что в плазменном столбе происходят микровзрывы капелек электролита. В месте взрыва концентрация атомов намного больше, чем в его окружении. Соответственно, больше и излучение, испускаемое атомами, оно наблюдается в виде вспышек.

Капельки электролита содержат ионы. После взрыва они разлетаются. Далее под воздействием электрического поля они дрейфуют к электродам, создавая диффузный электрический ток. Этим можно объяснить формирование значительного объема плазменного столба над жидким электролитом.

Электрическое поле создает направленное движение ионов и внутри капли. Положительные ионы натрия двигаются в сторону катода, а отрицательные ионы хлора – в сторону анода (рис. 3). Так возникает ионный ток. Можно предположить, что джоулево тепло, выделяемое при протекании этого ионного тока, приводит к взрыву капли. Возможно, что взрыв происходит по-другому. Однако, каков бы не был механизм взрыва, ионный ток играет определенную роль в этом процессе.

Выводы

Зона привязки электрического разряда к жидкому электролитному катоду представляет собой множество мелких опорных пятен, с размерами, составляющими десятые доли миллиметра. Плотность тока в опорных пятнах является значительной величиной и достигает до 100 А/см².

Жидкий катод распыляется в опорных пятнах. Мелкие капли, попавшие в разрядную область, нагреваются, испаряются и взрываются. Ионы, вынесенные из жидкого катода каплями электролита, разлетаются. В плазменном столбе образуется диффузный ионный ток.

Литература

1. Титова В.А., Стокозенко В.Г., Титова Ю.В., Морыганов А.П. Получение целлюлозы из льняного сырья с использованием плазмохимической обработки // Химия высоких энергий. 2015. Т. 49. № 6. С. 500-505.
2. Kashapov L.N., Kashapov N.F., Kashapov R.N., Denisov D.G. Plasma electrolytic treatment of products after selective laser melting // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 669. Issue 1. Article number 012029.
3. Shakirov Yu.I., Valiev R.I., Khafizjv A.A., Valiev R.A., Khakimov R.G. Erosion of electrode metal in the electric discharge under the exposure of electrolyte stream // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 669, Issue 1. Article number 012064.
4. Баринов Ю.А., Кузикова И.Л., Зиновьева С.В., Школьник С.М., Медведева Н.Г. Антимикробное действие разряда с жидким катодом на электродную жидкость // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41, вып. 17. С. 68-75.
5. Попов И.А., Щелчков А.В. Кипение различных жидкостей на микроструктурированных поверхностях // ИФЖ. 2014. Т. 87. № 6. С. 1362-1374.
6. Жуков М.Ф., Коротеев А.С., Урюков Б.А. Прикладная динамика термической плазмы. Новосибирск: Наука, 1975. С. 298.
7. Cserfalvi T., Mezei P. Operating mechanism of the electrolyte cathode atmospheric glow discharge // Fresenius J. Anal. Chem. 1996. V. 355. P. 813-819.
8. Петров А.Е., Калбенин Д.А., Титов В.А., Куленцан А.Л., Смирнов С.А. Сопоставление характеристик тлеющих разрядов атмосферного давления с металлическим и жидким электролитным катодами // Горение и плазмохимия. 2011. Т. 9. № 3. С. 160-168.
9. Мифтахов М.Н., Тазмеев Х.К., Тазмеев А.Х., Фридланд С.В. Некоторые результаты экспериментального исследования газового разряда между проточным электролитом и металлическим электродом // ИФЖ. 2006. Т. 79. № 3. С. 109-115.