

О ПРИРОДЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ ПЛАЗМЫ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА С ВОДНОРАСТВОРНЫМ КАТОДОМ

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

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева¹

tazmeevg@mail.ru

Набережночелнинский институт Казанского федерального университета²

Ключевые слова: газовый разряд, плазма в контакте с жидкостью, жидкий катод, воднорастворный катод, электролиз контактный с тлеющим разрядом.

Исследован газовый разряд между водным раствором хлорида натрия и медным электродом – анодом в воздухе при атмосферном давлении. Экспериментально обосновано, что электрическая проводимость плазмы газового разряда с воднорастворным катодом является преимущественно ионной.

Введение.

В течение последних десятилетий активно ведутся исследования физико-химических процессов в газовых разрядах атмосферного давления, находящихся в контакте с жидкостью [1]. Непрерывно расширяется диапазон возможностей для практических применений плазмы таких разрядов. Источники плазмы, в вариантах использования жидкости в качестве электродов, перспективны для очистки воды, инициирования химических реакций в растворах и ряда многих других практических приложений [2-6]. Однако понимание природы сложных явлений, формирующих процессы в разряде с интенсивно испаряющимся жидким электродом, в том числе воднорастворным катодом, в настоящее время остается крайне ограниченным. В частности, не раскрыта в полном объеме природа электрической проводимости плазмы. Как известно, нагретый металлический катод испускает электроны. Происходит термоэмиссия. В воде нет свободных электронов. Поэтому в случае воднорастворного катода эмиссия электронов практически отсутствует. Основными носителями тока в водных растворах являются катионы и анионы. Электрическая проводимость водного раствора является ионной. Какова электрическая проводимость плазмы над воднорастворным катодом? Каковы механизмы образования носителей тока в ней? Данная работа направлена на изучение этих вопросов.

Эксперимент.

На рис. 1 схематично изображен катодный узел газоразрядного устройства. Он состоит из небольшой емкости 1, в который вмонтирован металлический стержень 2.

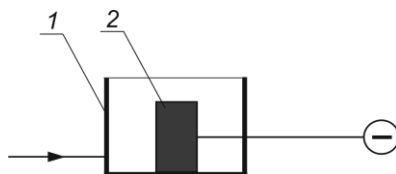


Рис. 1. Катодный узел.

После зажигания газового разряда в емкость 1 подавался водный раствор. Уровень жидкости поднималась и металлический стержень погружался в водный

раствор. Таким образом осуществлялся плавный переход от металлического (термоэмиссионного) катода к воднорастворному катоду (без эмиссии электронов).

Характеристики газового разряда с воднорастворным катодом исследовались на экспериментальной установке, подробное описание которой приведено в работе [7].

Скоростная видеосъемка производилась камерой Photron FASTCAM SA4. Ее технические характеристики позволяют детально изучить процессы в системах с жидкой средой [8].

Результаты эксперимента и их анализ.

На рис. 2 приведены мгновенные фотографии двух видов газового разряда. Слева – газовый разряд с термоэмиссионным катодом. Он горит между двумя медными электродами в воздухе. Справа – газовый разряд с воднорастворным катодом.

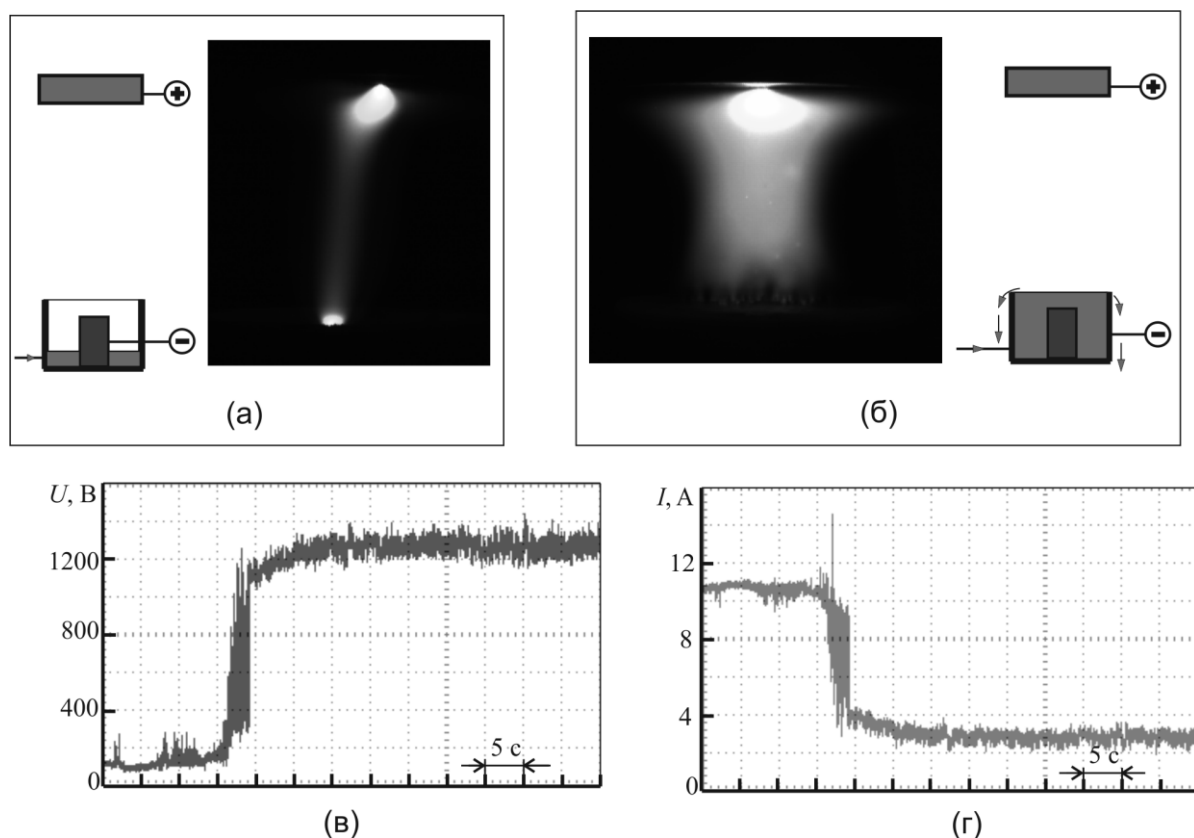


Рис. 2. Переход от термоэмиссионного катода к воднорастворному катоду. Катод: *а* – медный стержень с диаметром 10 мм; *б* – водный раствор хлорида натрия с концентрацией по массе 0.5 %. Межэлектродное расстояние 5 см. Экспозиция фотографий 0.2 мс. *в* и *г* – осциллограммы напряжения и тока.

Переход от одного вида газового разряда к другому образом осуществлялся у без изменений в системе электрического питания. При этом, как видно из фотографий, катодное пятно исчезло. Привязка разряда к катоду расширилась и охватила сравнительно большую площадь на поверхности водного раствора. Плазменный столб над катодом также расширился. Анодная привязка разряда осталась неизменной. В обоих вариантах она является точечной.

Как видно из представленных осциллограмм, произошли скачкообразные изменения напряжения и тока разряда. Напряжение увеличилось больше чем на порядок величины: от 100 до 1200 В. Следует отметить, что повышение напряжения в значительной мере происходит за счет увеличения катодного падения напряжения. Последнее зависит от концентрации водного раствора. В данном варианте оно составляет порядка 600 В. Имеется некоторое падение напряжения внутри самого

водного раствора (порядка 100 В). При учете этих параметров получается примерно 5-ти кратное увеличение напряжения. Ток разряда уменьшился примерно в 3 раза: от 11 до 3 А.

Наиболее вероятной причиной этих преобразований в газовом разряде является изменение электрической проводимости плазмы. В варианте с металлическим катодом преобладает электронная проводимость. Электроны легко перемещаются под воздействием слабого электрического поля. Поэтому напряжение в разряде небольшое. По сравнению с электронами ионы менее подвижны. Для создания ионного тока необходимо более сильное электрическое поле, соответственно, потребуется повышение напряжения. Следовательно, в варианте с воднорастворным катодом преобладает ионная проводимость.

В плазменном столбе над воднорастворным катодом наблюдаются множество мелких вспышек. В видеокадре они видны в виде светлых кружочков (рис.3а). Вспышки образуются в результате взрыва мелких капелек раствора, которые попадают в разрядную область. Их можно назвать вторичными взрывами. Первичные взрывы происходят на поверхности воднорастворного катода. В результате первичных взрывов происходит катодное распыление и образуются капельки. Каждая капелька представляет собой сгусток катионов и анионов, вынесенных из водного раствора. После вторичного взрыва они разлетаются и становятся носителями тока. При каждом взрыве прибавляется некоторое количество носителей тока. Из-за этого возникают пульсации тока. Они фиксируются на осциллограммах (рис. 3б). Частота пульсаций тока является достаточно большой. Она находится в мегагерцовом диапазоне.

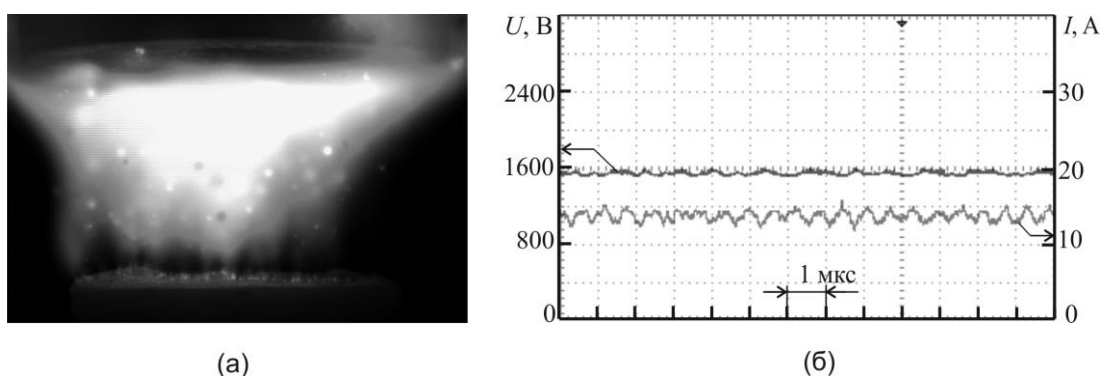


Рис. 3. Вторичные взрывы и высокочастотные пульсации тока. а – видеокадр, частота съемки 10000 кадров в секунду. б – осциллограммы тока и напряжения.

В электрическом поле разряда катионы и анионы дрейфуют в противоположных направлениях. Ионы хлора Cl^- дрейфуют в сторону анода, и таким образом они удаляются, образуя молекулярный хлор. Количество хлора в водном растворе уменьшается. Ионы натрия Na^+ дрейфуют к катоду и возвращаются в водный раствор. На поверхности графитовой пластины с отрицательным потенциалом они восстанавливаются. Металлический натрий моментально реагирует с водой, образуя гидроксид NaOH , который в свою очередь диссоциирует на ионы Na^+ и OH^- . Таким образом, ушедшие из водного раствора ионы хлора Cl^- заменяются на такое же количество гидроксил ионов OH^- . Происходит защелачивание раствора. Гидроксил ионы OH^- также участвуют в создании ионного тока в разряде. В конечном итоге на аноде, кроме хлора выделяется кислород и водяной пар. А на катоде выделяется молекулярный водород. В разрядном промежутке из капель образуется водяной пар.

Ионы натрия Na^+ , вышедшие из водного раствора в составе капель, практически все возвращаются обратно. Количество ионов натрия Na^+ в растворе не меняется, а количество растворителя (воды) уменьшается. Убыль можно компенсировать добавлением дистиллированной воды, т.е. во время горения разряда объем водного

раствора можно поддерживать неизменным. Такие опыты были проведены при фиксированном значении тока. Использовались водные растворы с различными первоначальными концентрациями C_0 .

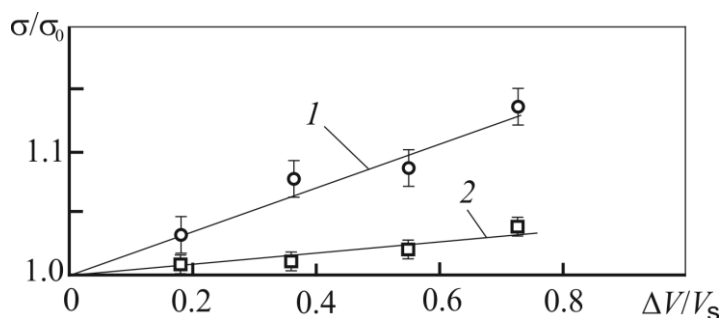


Рис. 4. Изменение удельной электрической проводимости водного раствора. ΔV – объем дистиллированной воды, добавленный в раствор. V_s – полный рабочий объем раствора. 1 – $C_0 = 0.02$ моль/л; 2 – 0.1. Ток разряда 8 А

Замеры, выполненные до и после опытов показали, что удельная электрическая проводимость раствора меняется незначительно. Такие результаты подтверждают циркуляцию ионов натрия Na^+ . В составе каплей они покидают раствор, а затем обратно возвращаются. Их концентрация практически не меняется. Как видно из представленных графиков наблюдается тенденция роста удельной электрической проводимости при увеличении продолжительности горения разряда. В некоторой степени это объясняется тем, в растворе происходит замена менее подвижных ионов хлора Cl^- на более подвижные гидроксил ионы OH^- .

Выводы

Получены экспериментальные факты, которые объясняются тем, что электрическая проводимость плазмы газового разряда с воднорастворным катодом является преимущественно ионной.

1. При прочих одинаковых условиях смена металлического катода водным раствором вызывает многократное увеличение напряжения горения газового разряда.

2. При соблюдении мер, компенсирующих убыль воды (растворителя), удельная электрическая проводимость водного раствора меняется незначительно.

3. В плазме газового разряда происходят взрывы капелек раствора, которые вызывают пульсации тока в мегагерцовом диапазоне.

Литература

1. Bruggeman P.J. et al. // Plasma Sources Science and Technology. 2015. V. 25. P. 053002.
2. Титов В.А., Стокозенко В.Г., Титова Ю.В., Морыганов А.П. // Химия высоких энергий. 2015. Т. 49. № 6. С. 500-505.
3. Валиев Р.И., Гайсин А.Ф., Гайсин Ф.М., Гумеров А.З., Насибуллин Р.Т., Садриев Р.Ш., Саримов Л.Р., Хафизов А.А. // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57. № 3-3. С. 66-69.
4. Тазмеева Р.Н., Зиганшин Р.Р., Тазмеев Х.К. // Вестник машиностроения. 2008. № 10. С. 87.
5. Tazmeev A.K., Tazmeeva R.N. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 789. P. 012058.
6. Тазмеев Г.Х., Тимеркаев Б.А., Тазмеев Х.К. // Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 7. С. 641-648.
7. Tazmeev Kh. K., Arslanov I. M., Tazmeev G. Kh. //J. Phys.: Conf. Ser. 2014. V. 567. P. 012001.
8. Попов И.А., Щелчков А.В. ИФЖ. 2014. Т. 87. № 6. С. 1362-1374.