

ФИЗИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ РАЗРЯДЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ВНЕШНИМ ОБТЕКАНИЕМ МЕДНОГО КАТОДА ВОДОЙ

Х.К. Тазмеев¹, Б.А. Тимеркаев², Г.Х. Тазмеев²

Набережночелнинский институт Казанского федерального университета¹
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.
Туполева²
tazmeevh@mail.ru

Экспериментально исследован газовый разряд постоянного тока между медными электродами в диапазоне токов 5-20 А. Межэлектродное расстояние варьировалось в пределах 45-70 мм. Катод представлял собой стержень с диаметром 10 мм и находился в потоке воды, вытекающем из диэлектрической трубки. Рассмотрены три варианта, которые различались расположением рабочего торца катода: 1) над водой; 2) вровень с поверхностью воды; 3) под водой. Установлено, что во втором варианте в плазменном столбе вблизи катода образуется протяженная зона с интенсивным излучением атомов водорода. В третьем варианте обнаружена значительная эрозия катода. Выявлено, что в процессе эрозии образуются мелкодисперсные частицы металлической меди.

Введение.

В последние годы наблюдается значительное повышение интереса к газовым разрядам, возбуждаемым в присутствии водной среды. Исследуются различные виды газовых разрядов: высоковольтные, низковольтные, импульсные и другие. Немало исследований направлено на применение газовых разрядов для синтеза наночастиц под водой и в водных растворах. В обзорных статьях перечисляются десятки способов осуществления этого процесса [1-3].

Целью данной работы явилось экспериментальное исследование газового разряда постоянного тока в воздухе при условии внешнего обтекания металлического катода потоком воды. Чаще всего твердотельный катод полностью погружается в водный поток. Такой вариант расположения катода встречается во многих работах [4-11]. В вариантах, когда металлический катод выступает из водного потока или близок к этому состоянию, газовый разряд малоизучен. Исследования в этой работе направлены на изучению этих вариантов.

Эксперимент.

Газовый разряд зажигался в воздухе между медными электродами при токах 5-15 А. Источником питания служил выпрямитель со сглаживающим фильтром. Выходное напряжение составляло 1760 В. Ток ограничивался балластным резистором. Разряд был ориентирован в вертикальном направлении. Катод располагался внизу, а анод – наверху. Анод представлял собой водоохлаждаемый диск с диаметром 50 мм. Он устанавливался горизонтально. Катод был выполнен в виде стержня с закругленным торцом и смонтирован внутри диэлектрической трубки (рис. 1). Вода подавалась в зазор между металлическим катодом и внутренней стенкой трубки. Для предотвращения образования накипи в системе охлаждения использовалась дистиллированная вода. Ее удельная электрическая проводимость находилась в пределах от 100 до 600 мкСм/см. Такие несколько завышенные значения получились из-за содержания хлорида натрия в узлах и агрегатах системы охлаждения.

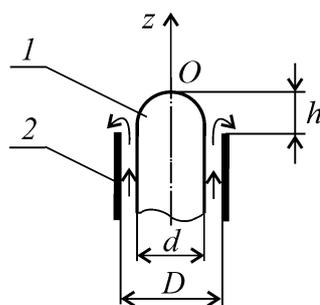


Рис. 1. Катодный узел. 1 – медный стержень; 2 – диэлектрическая трубка. d – 10 мм; D – 12,7. Стрелками указано направление течения воды.

Напряжение U и ток I регистрировались цифровым запоминающим осциллографом АКПП-15/1 с полосой пропускания 25 МГц. Фотографирование и спектроскопия газового разряда осуществлялись скоростной видеокамерой ВИДЕОСКАН-415 и высокоскоростным оптоволоконным спектрометром AvaSpec-3648. Видеокамера позволяла получить кадры с экспозицией до 1 мкс. Спектрометр регистрировал излучение в диапазоне длин волн 484–708 нм с разрешением 0,15 нм (дифракционная решетка 1200 штрихов/мм, входная оптическая щель 10 мкм). Излучение от отдельных участков разрядной области проецировалось на вход спектрометра через узел, скомбинированный из собирающей линзы и оптической щели.

Опыты проводились при различных выступах h медного стержневого катода. Были выделены три варианта. Характерным признаком, различающим эти варианты друг от друга, послужило расположение верхнего края торца катода относительно уровня воды в диэлектрической трубке (рис. 2).

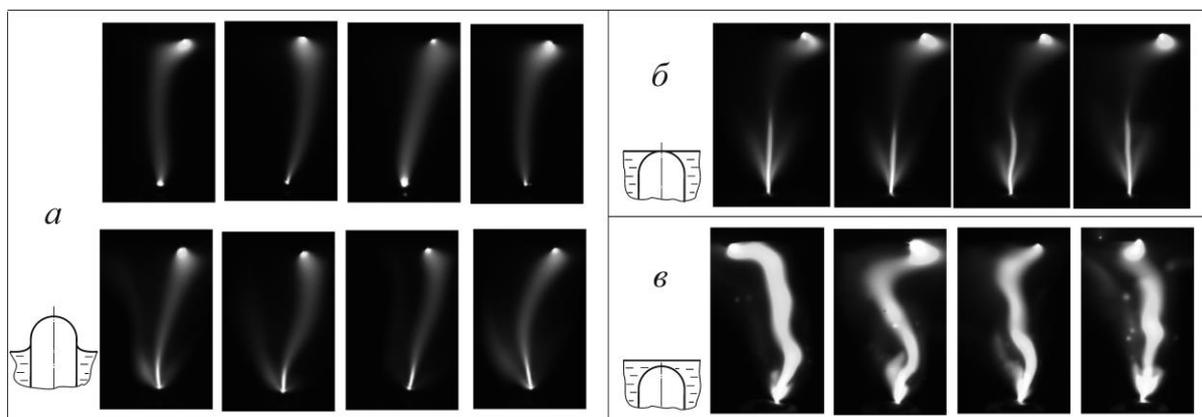


Рис. 2. Мгновенные фотографии газового разряда при разных вариантах обтекания катода водой. Экспозиция 200 мкс. Торцев металлического катода: a – над водой при $h = 5$ мм; $б$ – вровень с поверхностью воды; $в$ – под водой на глубине 0,5 мм. Расход воды: a (верхний ряд) – 10 г/с; a (нижний ряд), $б$, $в$ – 1,5. Среднее значение тока: a (верхний ряд) – 10,0 А; a (нижний ряд), $б$ – 14,7; $в$ – 8,7. Межэлектродное расстояние: a – 45 мм; $б$, $в$ – 50 мм.

В варианте a при малом расходе воды происходило сужение разрядного канала около катода (рис. 2а, нижний ряд). На мгновенных фотографиях этот участок разряда проявлялся в алом цвете, что характерно для бальмеровской линии H_{α} в спектре излучения водорода.

При переходе в вариант *б* картина около катода несколько изменилась. Яркий узкий канал около катода удлинялся и вытягивался вертикально вверх (рис. 2*б*). Вокруг него образовался желтый фон.

Характерной особенностью варианта *в* явилось то, что разрядный канал практически по всей длине был окрашен в зеленый цвет. Такая окраска свидетельствует об интенсивном поступлении атомов меди в разрядную область. По-видимому, атомарная медь образуется в электролизных процессах на катоде.

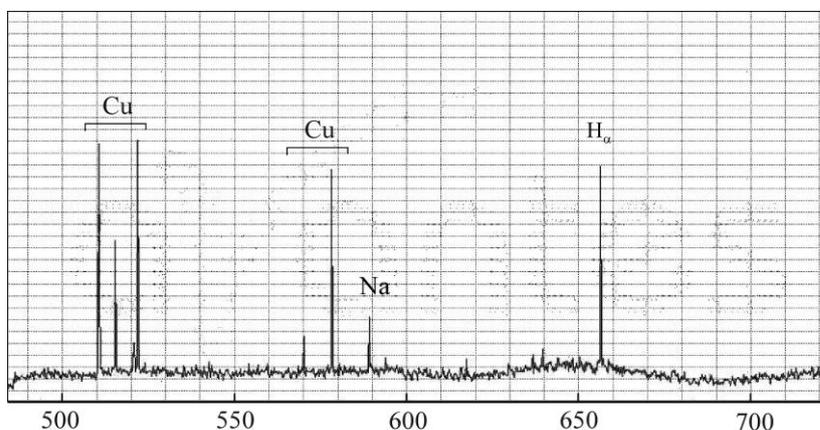


Рис. 3. Спектр излучения газового разряда (вариант *б*). Расстояние от катода – 30 мм. Межэлектродное расстояние – 50 мм. Ширина оптической щели 0,50 мм. Расход воды – 1,5 г/с. Ток – 10,0 А.

Присутствие атомов водорода, натрия и меди в плазменном столбе газового разряда подтвердили спектральные исследования (рис. 3). Распределения излучающих атомов вдоль разрядного канала, полученные в результате исследований, в полной мере соответствовали картинам на мгновенных фотографиях.

В вариантах *а* и *б* разряд горел устойчиво. Его электрические параметры были стабильны и практически не менялись во времени (рис. 4).

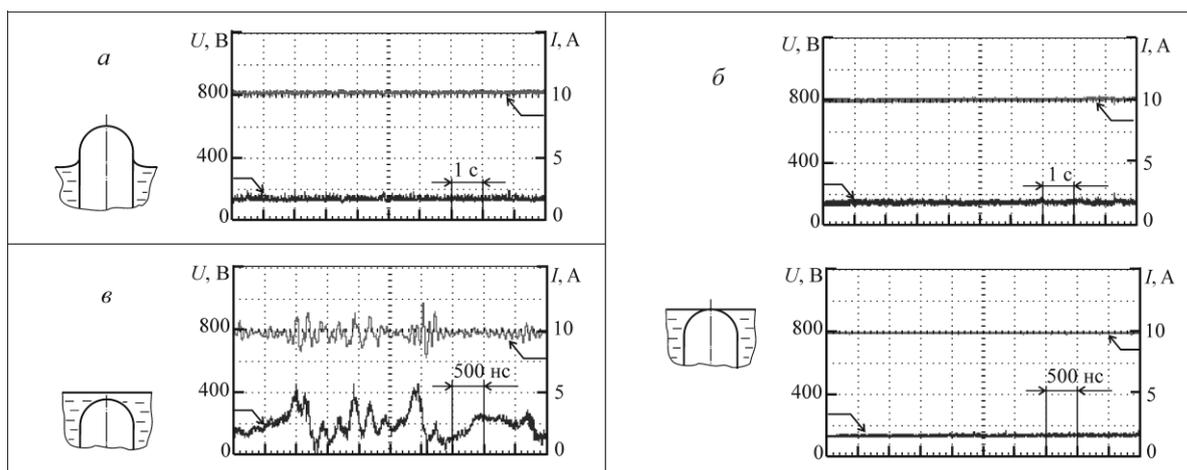


Рис. 4. Осциллограммы газового разряда при разных вариантах обтекания катода водой. Расход воды – 1,5 г/с. Удельная электрическая проводимость – 370 мкСм/см. Межэлектродное расстояние – 50 мм.

В варианте *в*, т.е. когда медный катод находился под водой, происходила значительная эрозия его торца. Некоторые результаты исследований этого процесса приведены в таблице. В опытах удельная электрическая проводимость воды σ была в пределах 200 – 225 мкСм/см. Поток воды m составил 1.5 г/с.

Таблица. Удельная эрозия медного катода.

$\langle I \rangle$, А	9	12	15	18
γ , мкг/Кл	22.3	20.6	21.6	19.1

Удельная эрозия γ медного катода оказалась достаточно большой величиной. Примечательно то, что его численное значение по порядку величины является таким же как в вакуумном импульсном разряде при многократных включениях тока [12].

В продуктах эрозии под микроскопом в отраженном свете отчетливо просматривались частицы металлической меди, что также свидетельствует о вероятности происхождения микровзрывов. Технические возможности микроскопа позволяли наблюдать частицы с размерами в десятки микрометров. Возможно, что присутствуют частицы еще меньших размеров.

Выводы

Поток воды, обтекающий медный катод, вызывает существенные изменения свойств газового разряда. Такие изменения наиболее четко проявляются в двух вариантах нахождения медного катода в водном потоке. Эти варианты различаются расположением рабочего торца катода: вровень с поверхностью воды и под водой. В варианте, когда торец катода находится вровень с поверхностью воды, в плазменном столбе вблизи катода формируется зона, в которой преобладает излучение атомов водорода. Можно считать, что под воздействием газового разряда образуется поток пароводяной плазмы, направленный от поверхности воды вертикально вверх.

Особенностью другого варианта является то, что медный катод подвергается значительной эрозии. Интенсивность эрозии практически такая же, как в процессе разрушения медного катода микровзрывами при многократных повторных импульсных разрядах в вакууме. Эрозия сопровождается образованием микрочастиц металлической меди.

Полученные экспериментальные результаты могут быть полезны при разработке плазменной техники для генерирования пароводяной плазмы, а также для синтеза дисперсных частиц меди.

Литература

1. Saito G., Akiyama T. // J. Nanomaterials. 2015. V. 2015. 123696.
2. Chen Q., Li J., Li Y. // J. Phys. D.: Appl. Phys. 2015. V. 48 (42). 42400.
3. Тепанов А.А., Крутяков Ю.А., Лисичкин Г.В. // Российский химический журнал. 2012. Т. LVI (5-6). С. 18.4
4. Тазмеев Г.Х., Тимеркаев Б.А., Тазмеев Х.К., Арсланов И.М. // Прикладная физика. 2016. № 1. С. 72.
5. Smirnov S.A., Shutov D.A., Bobkova E.S., Rybkin V.V. // Plasma Chem. Plasma Process. 2016. V. 36. P. 415.
6. Shakirov Yu.I., Valiev R.I., Khafizov A.A., Valiev R.A, Khakimov R.G. // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 669. 012064.
7. Тазмеева Р.Н., Тазмеев Б.Х. // Прикладная физика. 2014. № 1. С. 35.
8. Kashapov L.N., Kashapov N.F., Kashapov R.N., Denisov D.G. // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 669. 012029.
9. Tazmeev Kh.K., Tazmeev A.Kh. // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. V. 567. 012035.
10. Titov V.A., Rybkin V.V., Smirnov S.A., Kulentsan A.L., Choi H.-S. // Plasma Chem. Plasma Process. 2006. V. 26. P. 543.
11. Валиев Р.И., Гайсин Ал.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.
12. Месяц Г.А. Эктоны. Часть 1. Екатеринбург: УИФ Наука, 1993.