

**АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН
РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
КАЗАНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
КАЗАНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. А.Н. ТУПОЛЕВА – КАИ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КАЗАНСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»**

**НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПЛАЗМА
В ПРОЦЕССАХ НАНЕСЕНИЯ
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ**

**X Юбилейная международная
научно-техническая конференция**

Казань, 5–8 ноября 2018 г.

Сборник статей



**КАЗАНЬ
2019**

УДК 5
ББК 22
Н61

*Конференция проведена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований
и Правительства Республики Татарстан, грант № 18-42-161002*

Оргкомитет:

Кашапов Н.Ф. – доктор технических наук, член-корреспондент АН РТ (**председатель**);
Даутов Г.Ю. – доктор технических наук, член-корреспондент АН РТ (**зам. председателя**);
Кашапов Р.Н. – кандидат технических наук (**ученый секретарь**);
Лучкин А.Г. – кандидат технических наук;
Фадеев С.А.; Шайдуллин Л.Р.; Кашапов Л.Н.

Программный комитет:

Баязитов Р.М. – доктор физико-математических наук;
Бухараев А.А. – доктор физико-математических наук, член-корреспондент АН РТ;
Гайсин Ф.М. – доктор физико-математических наук;
Даутов Г.Ю. – доктор технических наук, член-корреспондент АН РТ (**зам. председателя**);
Зиганшин Р.Р. – доктор технических наук;
Исрафилов И.М. – доктор технических наук;
Кашапов Н.Ф. – доктор технических наук, член-корреспондент АН РТ (**председатель**);
Кашапов Р.Н. – кандидат технических наук (**ученый секретарь**);
Тимеркаев Б.А. – доктор физико-математических наук;
Файзрахманов И.А. – доктор физико-математических наук;
Шаехов М.Ф. – доктор технических наук

Н61 **Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий. X Юбилейная международная научно-техническая конференция** (Казань, 5–8 ноября 2018 г.): сб. статей. – Казань: Издательство Казанского университета, 2019. – 496 с.

ISSN 2312-2285
ISBN 978-5-00130-209-4

Сборник содержит материалы X Юбилейной международной научно-технической конференции «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий», предоставленные учеными из ведущих учебных и научных учреждений Российской Федерации.

Организаторами конференции являются Академия наук РТ, Министерство образования и науки РТ, Российский фонд фундаментальных исследований, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук».

УДК 5
ББК 22

ISSN 2312-2285
ISBN 978-5-00130-209-4

© Издательство Казанского университета, 2019

О МЕХАНИЗМЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА МЕЖДУ ПОТОКОМ ЭЛЕКТРОЛИТА И МЕТАЛЛИЧЕСКИМ АНОДОМ

Г.Х. Тазмеев¹, Б.А. Тимеркаев², Х.К. Тазмеев³

¹Набережночелнинский государственный педагогический университет

*²Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ*

*³Казанский (Приволжский) федеральный университет,
Набережночелнинский институт
tazmeevg@mail.ru*

Аннотация. Экспериментально исследован электрический разряд между проточным электролитом и металлическим электродом в режимах, в которых происходит интенсивный перенос вещества жидкого электролита в плазменный столб. Прикатодная область разряда исследована методом скоростной визуализации. Предложена математическая модель для описания процессов переноса вещества и зарядов из жидкого электролитного катода в плазму.

Введение

Электрические разряды с жидкими электродами являются источниками плазмы с большими возможностями для практических применений. Они перспективны для использования в синтезе различных функциональных материалов, плазменной активации жидких реагентов, водоочистке, обработке металлических и неметаллических поверхностей [1–4]. Интерес к таким электрическим разрядам прежде всего обусловлен тем, что они позволяют получить неравновесную плазму при атмосферном давлении. При этом они могут быть реализованы сравнительно простыми техническими средствами.

На сегодняшний день значительные успехи достигнуты в изучении электрических разрядов в варианте с жидким электролитным катодом при небольших токах [4]. Однако, несмотря на наличие значительного количества экспериментального материала, слаботочные электрические разряды остаются мало исследованными. Физические процессы в электрических разрядах еще более усложняются при повышении тока. Возрастает тепловое воздействие на электролит, усиливаются процессы испарения и катодного распыления, происходит бурное газовыделение внутри электролита. При этом электрический разряд становится протяженным и объемным. Появляется возможность создания мощного плазменного потока с характеристиками, приемлемыми для энергоемких плазменных технологий [5–6]. В связи с этим целью работы было исследование механизмов, обеспечивающих самостоятельность сильноточного объемного электрического разряда между потоком электролита и металлическим электродом.

Эксперимент

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Электрический разряд (1) зажигался между потоком электролита (2), который вытекал вверх из цилиндрического канала (3), и водоохлаждаемым металлическим электродом (4). Внутри цилиндрического канала (3) была смонтирована графитовая пластина (5), и она соединялась с отрицательным полюсом источника питания. Разряд горел при неизменном токе $I = \text{const}$.

Электролитом служил раствор хлорида натрия в дистиллированной воде. Часть водного раствора расходовалась на образование плазмы. Убыль компенсировалась добавлением дистиллированной воды (6) (растворителя) в рабочую емкость (7) гидросистемы. При этом объем водного раствора в гидросистеме экспериментальной установки поддерживался постоянным $V_s = \text{const}$.

Электрическое питание подавалось от источников на базе инверторного преобразователя. Источники питания такого типа обладают тем преимуществом, что позволяют поддерживать ток с высокой точностью.

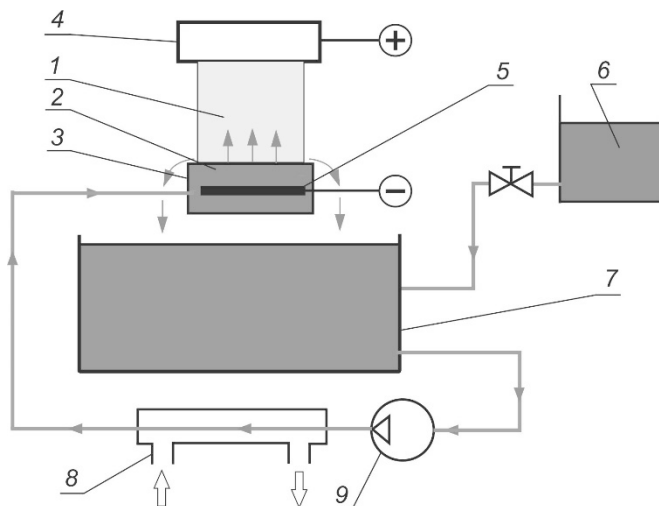


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Во время горения разряда электролит нагревался. Его охлаждение производилось циркуляцией через теплообменник (8) с помощью гидронасоса (9).

Удельная электрическая проводимость σ электролита определялась методом прямой кондуктометрии с помощью прибора «АНИОН 4150». Измерение водородного показателя водного раствора рН производилось с помощью потенциометрического канала прибора «АНИОН 4150». Настройка осуществлялась по четырем буферным растворам с рН = 4,01, 6,86, 9,18 и 12,43, приготовленным из стандарт-титров.

Скоростная видеосъемка производилась камерой Photron FASTCAM SA4. Ее технические характеристики позволяют детально изучить процессы в системах с жидкой средой [7].

Напряжение U и ток I регистрировались цифровым запоминающим осциллографом АКПП-15/1 с полосой пропускания 25 МГц. Спектрометрические исследования осуществлялись высокоскоростным оптоволоконным спектрометром AvaSpec-3648.

Математическая модель

Математическая модель процесса описывает ситуацию, когда малые порции электролита, удаляемые из гидросистемы, компенсируются в непрерывном режиме добавлением растворителя-воды, и при этом полный объема водного раствора V_s остается неизменным. В этих условиях относительная концентрации электролита меняется по экспоненциальному закону

$$\frac{C}{C_0} = \exp\left(-\frac{k \cdot \Delta V}{V_s}\right). \quad (1)$$

Здесь C_0 – первоначальная молярная концентрация электролита; ΔV представляет собой объем дистиллированной воды, добавленной в гидросистему во время горения разряда.

Значению параметра $k = 1$ соответствует ситуация, когда малые порции электролита удаляются без изменения концентрации. Варианты $k < 1$ и $k > 1$ означают, что в составе удаляемой порции концентрация растворенного вещества (или какого-либо его компонента), соответственно, меньше или больше в k раз, чем в электролите с объемом $V_s = \text{const}$.

Результаты эксперимента и их анализ

Из-за протекания электролизных процессов водный раствор хлорида натрия, служащий в качестве катода, защелачивается во время горения разряда. Ионы хлора Cl^- в соотношении 1:1 заменяются на гидроксид-ионы OH^- . Если добавить в раствор соляную кислоту, то можно нейтрализовать его щелочную компоненту. Такая процедура была осуществлена титрованием проб, отобранных из электролита-катода. Титрант добавлялся в отобранную пробу до полного восстановления первоначального значения водородного показателя pH.

Из материального баланса процесса титрования была получена формула

$$\frac{c}{c_0} = 1 - \frac{c_t}{c_0} \cdot \frac{\Delta v}{v}, \quad (2)$$

где c_t и Δv – молярная концентрация и объем титранта; v – объем пробы.

Применение математической модели и результатов титрования позволило определить числовые значения параметра k . При использовании электролитов с концентрациями в пределах от 0,02 до 0,3 моль/л все значения k были меньше единицы. Это означает, что в малых порциях, которые удаляются из электролита, концентрация хлорида натрия меньше, чем в самом электролите. Причем с увеличением первоначальной концентрации результаты смещались в сторону малых значений параметра k .

Кондуктометрические измерения показали, что, несмотря на добавление в водный раствор значительного количества дистиллированной воды во время горения разряда, удельная электрическая проводимость электролита σ не снижалась, а наоборот, она несколько увеличивалась.

Если предположить, что все ионы Na^+ , вышедшие из электролита в составе капель, возвращаются обратно, то в целом общее количество ионов в электролите не должно изменяться. При этом ушедшие из электролита анионы Cl^- будут заменены на такое же количество гидроксид-ионов OH^- . В такой ситуации σ не должна уменьшаться.

Высокоскоростная визуализация отчетливо показала распыление электролита в виде мелких капелек (рис. 2).

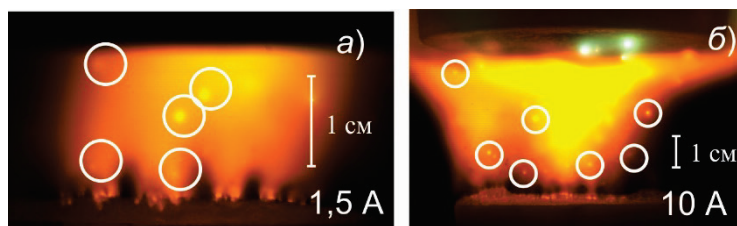


Рис. 2. Взрывы капелек электролита в разрядной области

В видеокадрах наблюдались вспышки (выделены белыми кружочками). Они возникали из-за взрывного испарения капелек, подвергавшихся мощному тепловому воздействию плазмы. Длительность вспышек составляла ~ 2 мс.

В нижней части видеокадров (рис. 2) видно, что зона привязки разряда к катоду является неоднородной. Ближе к катоду светящийся столб расщепляется на множество каналов. Эти каналы упираются на поверхность электролита, образуя мелкие светящиеся опорные пятна.

Отдельно взятые опорные пятна существовали не долго. Минимальное время жизни составило ~ 1 мс. Плотность тока j_k на них была в пределах $50\text{--}100$ А/см². При этом среднее значение j_k , определяемое как отношение тока I к полной площади светящейся зоны на поверхности электролита, составило ~ 1 А/см², т. е. было в пределах тех значений j_k , которые имеют место в слаботочных режимах.

В осциллограммах тока регистрировались высокочастотные пульсации (рис. 3). Можно считать, такие пульсации возникают в результате взрывов капелек, так как при каждом взрыве в плазму впрыскиваются новые порции носителей тока в виде ионов.

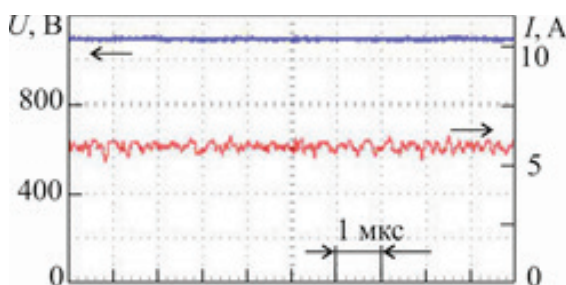


Рис. 3. Осциллограммы тока и напряжения

Выводы

Таким образом, из опытов следует, что в сильноточных режимах происходит интенсивное поступление вещества из электролита в плазму в виде мелких капелек. В этих условиях можно считать, что ток в основном создается ионами, которые переносятся капельками.

Литература

1. 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.
2. Титов В.А., Стокозенко В.Г., Титова Ю.В., Морыганов А.П. // Химия высоких энергий. – 2015. – Т. 49. – № 6. – С. 500–505.
3. Kashapov L.N, Kashapov N.F., Kashapov R.N., Denisov D.G. // J. Phys.: Conf. Ser. – 2016. – Vol. 669. – P. 012029.
4. Bruggeman P.J. et al. // Plasma Sources Science and Technology. – 2016. – Vol. 25. – P. 053002.
5. Тазмеев Х.К., Арсланов И.М., Тазмеев Г.Х. // Прикладная физика. – 2013. – № 4. – С. 33–37.
6. Тазмеев Г.Х., Тимеркаев Б.А., Тазмеев Х.К., Арсланов И.М. // Прикладная физика. – 2016. – № 1. – С. 72–76.
7. Попов И.А., Щелчков А.В. // ИФЖ. – 2014. – Т. 87. – № 6. – С. 1362–1374.
8. Петров А.Е., Калбенин Д.А., Титов В.А., Куленцан А.Л., Смирнов С.А. // Горение и плазмохимия. – 2011. – Т. 9. – № 3. – С. 160–168.