

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

**НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПЛАЗМА
В ПРОЦЕССАХ НАНЕСЕНИЯ
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ**

XII Международная научно-техническая конференция

Казань, 10–12 ноября 2020 г.

Сборник статей



**КАЗАНЬ
2021**

УДК 533.9
ББК 22.333
Н61

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.; 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:** XII Международная научно-техническая конференция (Казань, 10–12 ноября 2020 г.): сборник статей. – Казань: Издательство Казанского университета, 2021. – 154 с.

ISSN 2312-2285
ISBN 978-5-00130-526-2

Сборник содержит материалы XII 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, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ, Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук».

УДК 533.9
ББК 22.333

ISSN 2312-2285
ISBN 978-5-00130-526-2

© Издательство Казанского университета, 2021

8. Hsu C. C., Nierode M. A., Coburn J. W., Graves D. B. Comparison of model and experiment for Ar, Ar/O₂ and Ar/O₂/Cl₂ inductively coupled plasmas // J. Phys. D: Appl. Phys. 2006. V. 39(15). P. 3272-3284.

9. Lee B. J., Efremov A., Kim J., Kim C., Kwon K.-H. Peculiarities of Si and SiO₂ etching kinetics in HBr+Cl₂+O₂ inductively coupled plasma // Plasma Chem. Plasma Proc. 2019. V. 39(1). P. 339-358.

Chistophorou L. G., Olthoff J. K. Fundamental electron interactions with plasma processing gases. Springer Science+Business Media. New York. 2004. 780 p.

УДК 537.523.9

ОБ УСЛОВИЯХ ОБЪЕМНОГО ГОРЕНИЯ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА С ВОДНОРАСТВОРНЫМ КАТОДОМ В ПРОТЯЖЕННОМ РАЗРЯДНОМ ПРОМЕЖУТКЕ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

Х.К. Тазмеев, Г.Х. Тазмеев

*Казанский федеральный университет,
Набережночелнинский институт*

HKTazmeev@kpfu.ru

Экспериментально исследован газовый разряд между жидким электролитным катодом и медным анодом. В качестве жидкого электролита использованы водные растворы хлорида натрия. Разряд зажигался в открытой воздушной атмосфере в диапазоне токов 2-5 А на расстояниях 3-18 см между электродами. Выявлены условия формирования объемного плазменного столба в разрядном промежутке.

Введение

Газовые разряды, возбуждаемые в контакте с жидкими электролитами, обладают большими потенциальными возможностями практического применения [1-7]. Одним из свойств разряда, представляющих практический интерес, является объемное горение. Существуют такие режимы, при которых образуется плазменный столб достаточно больших размеров. К примеру, в работе [8] получен разряд

с протяженностью до 0,5 м. Зажигание разряда на больших межэлектродных расстояниях возможно при высоких напряжениях. Однако, этот способ не всегда приводит к желаемому результату. Нарушается пространственная структура плазменного столба. В разрядном промежутке появляются контрагированные каналы [9]. Целью данной работы явилось более подробное изучение условий, влияющих на объемное горение разряда между воднорастворным катодом и металлическим анодом.

Эксперимент

Экспериментальная установка схематично изображена на рис. 1.

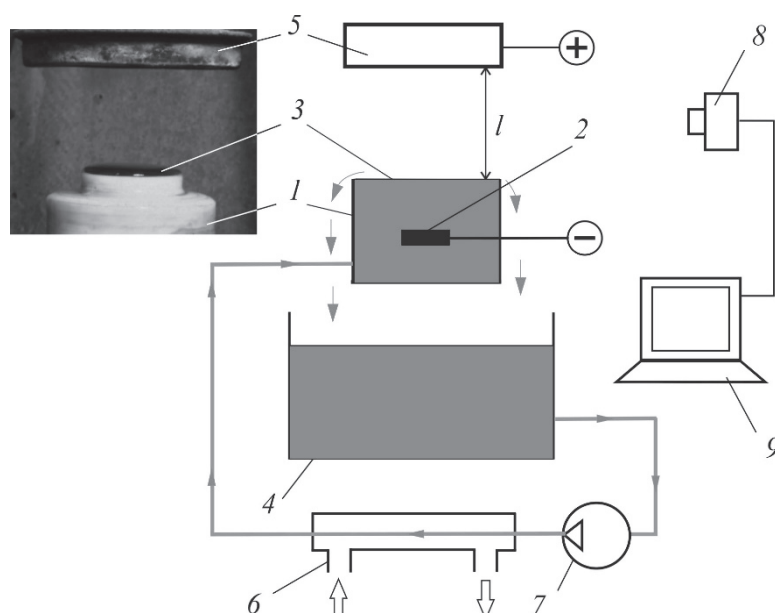


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

На фотоснимке представлено газоразрядное устройство, которое использовалось в экспериментах. Корпус 1 катодного узла был изготовлен из диэлектрика. Внутри него была смонтирована графитовая пластина 2. К этой пластине подводился отрицательный потенциал от источника питания. Электролит 3 вытекал из катодного узла в вертикальном направлении вверх и стекал в рабочую емкость 4. В качестве электролита использовались растворы хлорида натрия в дистиллированной воде. Над катодным узлом располагался анод 5. Он был изготовлен из меди в виде диска с диаметром 90 мм и охлаждался водой. Опыты проводились при различных взаимных расположениях

катодного узла и анода. Длина l разрядного промежутка устанавливалась в пределах от 3 до 20 см.

Для охлаждения электролита использовался теплообменник 6, охлаждаемый водой. Электролит циркулировал с помощью гидронасоса 7. Массовая скорость потока электролита менялась в пределах 5-30 г/с. Температура электролита измерялась хромель-алюмелевыми термопарами, установленными на входе в катодный узел и на его выходе.

Концентрация C и удельная электрическая проводимость \square электролита измерялись кондуктометром АНИОН 4150. Для измерения тока I использовался стрелочный прибор М2015 класса точности 0.2. Напряжение U между графитовой пластиной 2 и анодом 5 измерялось такого же класса точности прибором М2016, к которому присоединялось добавочное сопротивление. Мгновенные изображения разряда фотографировались скоростной камерой ВИДЕОСКАН-415. Информация от скоростной камеры 8 передавалась компьютеру 9.

Электрическое питание подавалось от источника питания на базе инверторного преобразователя. Выбор был обусловлен тем, что источники питания такого типа обеспечивают высокую стабильность токового режима. Ошибки стабилизации тока не превышают 1 %.

Результаты эксперимента и их анализ

На рис. 2 приведены видеокадры, полученные при небольшом разрядном токе. Здесь представлены непрерывные последовательности кадров для двух межэлектродных расстояний.

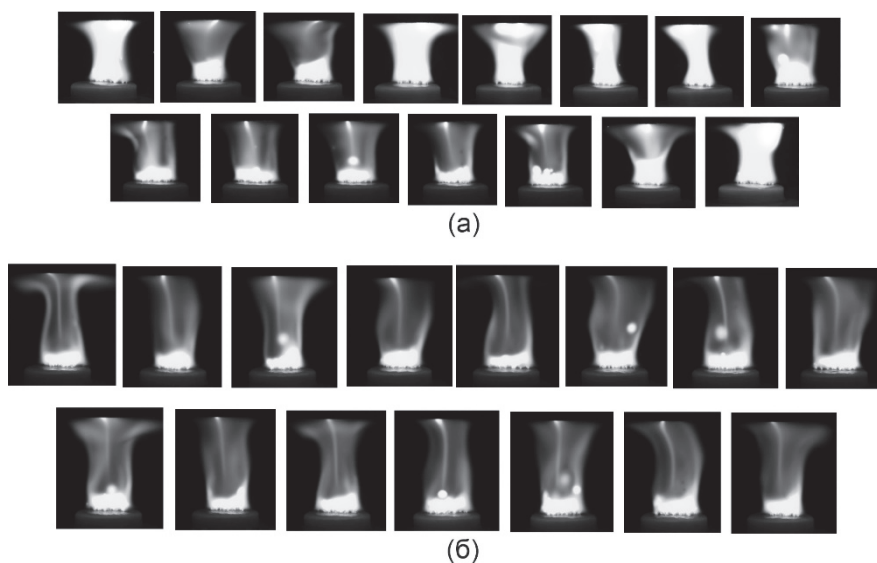


Рис. 2. Видеокадры газового разряда. Продолжительность съемки 1 мин. Экспозиция 0,2 мс. $I = 1,8$ А. (а) - $l = 5$ см; (б) - 7. $C = 5$ г/с

В первой последовательности кадров (рис.2а) наблюдаются режимы горения, которые отличаются заполнением межэлектродного промежутка плазмой. В самом первом кадре плазма занимает пространство между электродами полностью. В следующем кадре объемная плазма зафиксирована только в нижней части около катода. Чередование таких ситуаций в видеокадрах наблюдалось в течение продолжительного времени. При повторных зажиганиях разряда ситуация не менялась.

Во второй последовательности кадров (рис.2б) отсутствует полное заполнение межэлектродного пространства однородным ярким свечением. Со стороны анода сверху вниз простирается узкий разрядный канал с менее ярким свечением. Таким образом, при малых токах на больших межэлектродных расстояниях объемное горение разряда происходит только вблизи катода. На межэлектродных расстояниях более 7 см разряд горел неустойчиво.

На рис. 3 представлены мгновенные фотографии разряда при повышенном токе на различных межэлектродных расстояниях. Как видно объемное свечение заполняет разрядный промежуток, который имеет достаточно большую протяженность (рис 3а и 3б). Однако расстояние l между катодом и анодом можно было увеличить только до определенного предела. На межэлектродных расстояниях, близких к предельному, происходило нарушение однородной пространственной структуры разряда. Около анода время от времени появлялся узкий разрядный канал, который был окружен областью слабого свечения (рис. 3в). Таким образом повышение тока обеспечивало объемное горение разряда на достаточно больших межэлектродных расстояниях. При токе 5 А объемный однородный плазменный столб образовался на расстояниях до 13 см.

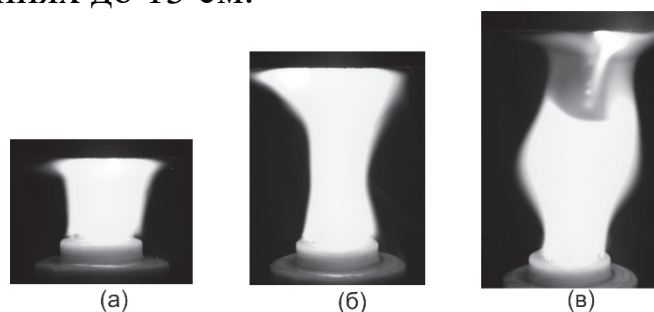


Рис. 3. Мгновенные фотографии разряда. Экспозиция 0,2 мс. $I = 5,0$ А.
 (а) - $l = 5$ см; (б) - 7; (в) - 13. $C = 5$ г/с. ($\square = 10,80$ мСм/см)

Картина свечения разряда менялась при использовании в качестве электролита водных растворов хлорида натрия с различными концентрациями (рис. 4).

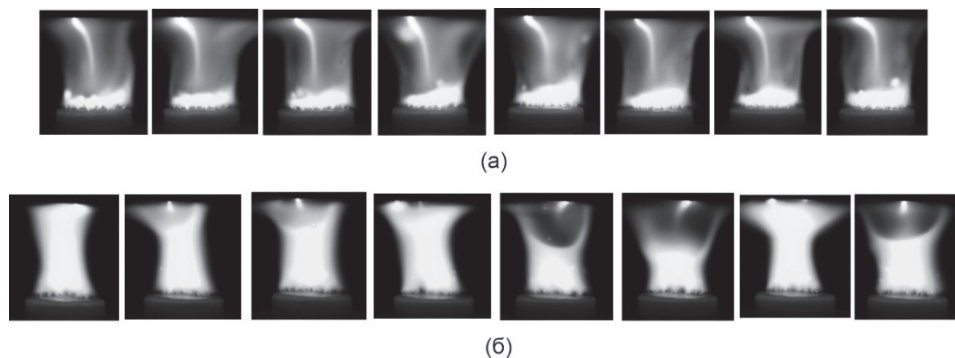


Рис. 4. Последовательности видеокадров. Экспозиция 0,2 мс. $I = 3,0$ А. $l = 6$ см. (а) - $C = 3,5$ г/с; (б) – 5

В случае с меньшей концентрацией электролита объемное горение разряда не наблюдалось (рис. 4а). При тех же условиях применение электролита с большей концентрацией привело к появлению кадров, в которых зафиксировано однородное свечение межэлектродного пространства (рис. 4б).

На рис. 5 приведены фотоснимки плазменного столба на протяженном разрядном промежутке при различных расходах электролита через катодный узел. При больших расходах электролит нагревался в меньшей степени. В этом случае наблюдалось нарушение однородности плазменного столба (рис.5а). При малых расходах электролит нагревался до пленочного кипения в зоне контакта с плазмой. В этих условиях происходило объемное горение разряда (рис.5б).

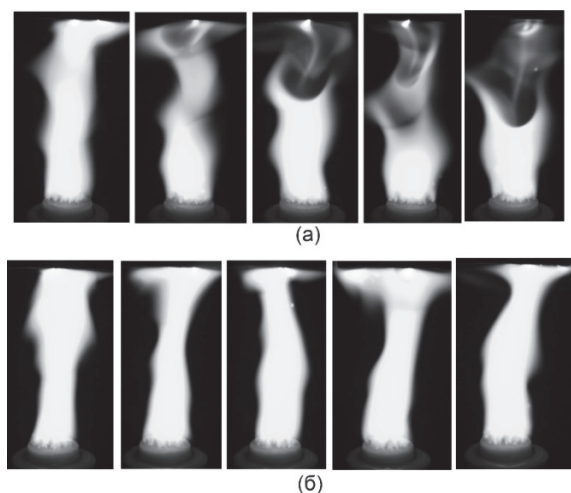


Рис. 5. Фотоснимки плазменного столба разряда на протяженном разрядном промежутке. Экспозиция 0,2 мс. $I = 5,0$ А. $l = 18$ см. $C = 5$ г/с; Температура электролита на выходе из катодного узла: (а) – 40 °С; (б) – 54.

Выводы

Выявлены факторы, влияющие на формирование плазменного столба между воднорастворным катодом и металлическим анодом. Установлены режимы объемного горения разряда в открытом воздухе на межэлектродных промежутках с протяженностью до 18 см.

Литература

1. Akhmadullina L.I. et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1588. P. 012012.
2. Khlyustova A., Sirotkin N., Titov V., Agafonov A. // Current Applied Physics. 2020. V. 20 (12). P. 1396-1403.
3. Khafizov A.A. et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 669. P. 012030.
4. Kashapov R.N., Kashapov L.N., Kashapov N.F. // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. V. 1328. P. 012105
5. Tazmееv A.K., Tazmееva R.N. // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 1058. P. 012036.
6. Gibadullina G.R., Tazmееv A.H., Tazmееva R.N. // 2015 International Journal of Applied Engineering Research. 2015. V. 10 (24). P. 45015-45021.
7. Tazmееv K.K., Arslanov I.M., Tazmееv B.K., Tazmееv G.K. J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1588. P. 012061
8. Тазмеев Х.К., Арсланов И.М., Тазмеев Г.Х. // Прикладная физика. 2013. № 4. С. 33.
9. Tazmееv Kh.K., Tazmееv A.Kh. // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. V. 567. P. 012035.

УДК 537.525

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА С СЕКЦИОНИРОВАННЫМ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ КАНАЛОМ

Р.Ф. Юнусов, М.М. Гарипов

*Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань*

optanir@mail.ru

Ключевые слова: тлеющий разряд, разрядная камера, вольтамперная характеристика, положительный столб, распределение потенциала.