

**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**

**Сборник статей
XIII Международной научно-технической конференции**

Казань, 2–4 ноября 2021 г.



**КАЗАНЬ
2022**

УДК 533.9
ББК 22.333
Н61

Организационный комитет:

доктор технических наук, профессор, член-корреспондент
Академии наук Республики Татарстан **Н.Ф. Кашапов** (председатель);
доктор технических наук, профессор, член-корреспондент
Академии наук Республики Татарстан **Г.Ю. Даутов** (заместитель председателя);
кандидат технических наук, доцент **Р.Н. Кашапов** (ученый секретарь);
кандидат технических наук, доцент **А.Г. Лучкин**;
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник **С.А. Фадеев**;
Л.Н. Кашапов

Программный комитет:

доктор физико-математических наук, профессор **Р.М. Баязитов**;
доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент
Академии наук Республики Татарстан **А.А. Бухараев**;
доктор физико-математических наук, профессор **Ф.М. Гайсин**;
доктор технических наук, профессор, член-корреспондент
Академии наук Республики Татарстан **Г.Ю. Даутов** (заместитель председателя);
доктор технических наук, профессор **Р.Р. Зиганшин**;
доктор технических наук, профессор **И.М. Ибрафилов**;
доктор технических наук, профессор, член-корреспондент
Академии наук Республики Татарстан **Н.Ф. Кашапов** (председатель);
кандидат технических наук, доцент **Р.Н. Кашапов** (ученый секретарь);
доктор физико-математических наук, профессор **Б.А. Тимеркаев**;
доктор физико-математических наук, профессор **И.А. Файзрахманов**;
доктор технических наук, профессор **М.Ф. Шаехов**

Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий:
Н61 сборник статей XIII Международной научно-технической конференции (Казань, 2–4 ноября 2021 г.). – Казань: Издательство Казанского университета, 2022. – 200 с.

ISSN 2312-2285
ISBN 978-5-00130-642-9

Сборник содержит материалы XIII Международной научно-технической конференции «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий», представленные учеными из ведущих учебных и научных учреждений Российской Федерации.

Организаторами конференции являются Академия наук Республики Татарстан, Министерство образования и науки Республики Татарстан, 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 978-5-00130-642-9

© Издательство Казанского университета, 2022

ВЛИЯНИЕ ПОРИСТОЙ ВСТАВКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА В ГАЗОВОМ РАЗРЯДЕ С ЖИДКИМ ЭЛЕКТРОЛИТНЫМ КАТОДОМ

Х.К. Тазмеев¹, Р.Н. Тазмеева¹, Б.Х. Тазмеев²

¹ *Казанский федеральный университет, Набережночелнинский институт*

² *Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина*

НКТazmeev@kpfu.ru

Аннотация

Экспериментально исследован газовый разряд с жидким электролитным катодом при наличии пористой вставки на границе «разряд-жидкость». Диапазон токов составил 5–10 А. В качестве жидкого электролита были использованы водные растворы хлорида натрия с удельной электрической проводимостью 10–15 мСм/см. Получены плазменные потоки с различной ориентацией в пространстве.

Введение

В настоящее время наблюдается повышенное внимание к газовым разрядам с жидкими электролитными электродами. Изыскиваются новые практические приложения, в том числе в процессах нанесения покрытий и модификации поверхностей. К примеру, установлены возможности создания микрорельефа с заданными параметрами на поверхности металла [1–2]. В классическом варианте разряд зажигается над жидким электродом. Плазменный столб имеет вертикальную ориентацию. Такая конфигурация разряда затрудняет формирование плазменного потока в других направлениях, кроме вертикального. Требуются технические решения, которые позволяют формировать другую геометрию разряда. Оригинальный подход к этой проблеме экспериментально опробован в работах [3–5]. Авторами разработан катодный узел с использованием пористого огнеупорного материала. Электролит подавался во внутреннюю полость катодного узла и частично поступал через пористую стенку в разрядный промежуток. Такой катодный узел, был назван «пористым электролитным катодом», сокращенно ПЭК. С помощью ПЭК получены разряды с горизонтальной ориентацией плазменного столба. Эксперименты проведены в диапазоне токов 1–4 А. Мощность, вкладываемая в разряд, не превышала 2 кВт. Естественно, при таких сравнительно малых энергетических параметрах интенсивные потоки плазмы формировать невозможно. Для этого требуются более мощные разряды. В связи с этим целью данной работы явилось продолжение исследований при повышенных токах и мощностях.

Эксперимент

Экспериментальная установка схематично изображена на рис. 1.

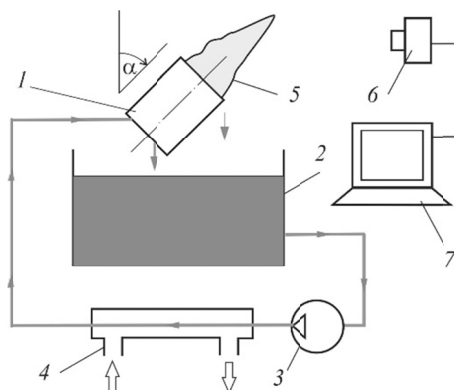


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки

Газоразрядное устройство 1 условно изображено с наклоном вверх при фиксированном угле отклонения α от вертикали. Электролит подавался из резервуара 2 с помощью насоса 3 через теплообменник 4. Часть электролита расходовалась на образование плазменного потока 5. Избыточное количество электролита стекало обратно в резервуар 2. Подача электролита с избытком обеспечивала охлаждение катодного узла разрядного устройства. Скоростная визуализация разряда осуществлялась видеокамерой 6. Информация от скоростной камеры 6 передавалась компьютеру 7.

В качестве электролита использовались растворы хлорида натрия в дистиллированной воде. Удельная электрическая проводимость растворов находилась в пределах 10–15 мСм/см.

Электрическое питание подавалось от трехфазного двухполупериодного выпрямителя. Пульсации напряжения сглаживались *C-L-C* фильтром.

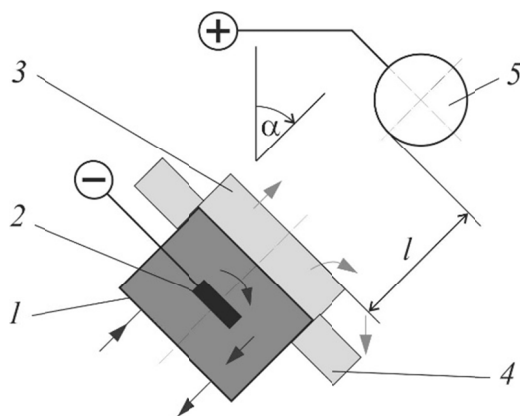


Рисунок 2. Газоразрядное устройство

На рисунке 2 представлена схема разрядного устройства. Катодный узел содержит цилиндрический корпус 1, графитовый токоподвод 2, пористую вставку 3 и теплозащитный экран 4. Пористая вставка 3 является сменной. В опытах были использованы варианты с двумя диаметрами: 40 и 50 мм. Стрелками указаны направления течения электролита. Корпус 1 выполнен из диэлектрического материала. Для изготовления пористой вставки 3 использован огнеупорный материал. Теплозащитный экран 4 выполнен из такого же материала. На расстоянии l от пористой вставки 3 смонтирован металлический анод 5. Он изготовлен из медного стержня с диаметром 25 мм. Анод является водоохлаждаемым.

Результаты эксперимента и их анализ

На рисунке 3 приведены видеок кадры, полученные при расположении разрядного устройства с наклоном вверх.



Рисунок 3. Плазменный поток, направленный под углом вверх. Экспозиция 0,2 мс. $I = 8$ А. $l = 6$ см. Белыми линиями обозначены контуры торцов катодного узла и анода

На рисунке 4 представлены видеокадры, полученные при горизонтальном расположении разрядного устройства.

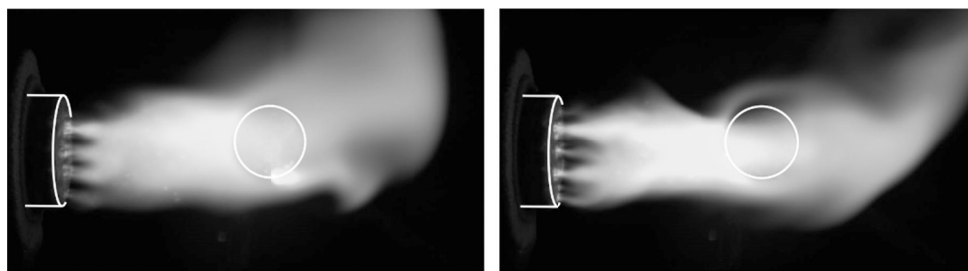


Рисунок 4. Горизонтальный плазменный поток. Экспозиция 0,2 мс. $I = 9$ А. $l = 6$ см

На рисунке 5 приведены видеокадры, полученные при расположении разрядного устройства с наклоном вниз.

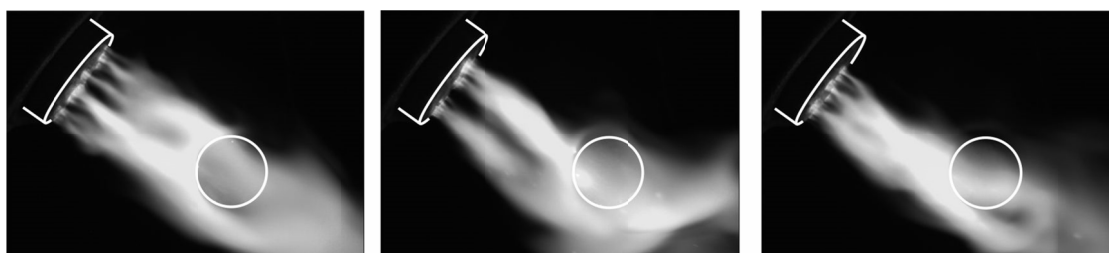


Рисунок 5. Плазменный поток, направленный под углом вниз. Экспозиция 0,2 мс. $I = 8$ А. $l = 6$ см

На рисунках 3, 4 и 5 стержневой металлический анод расположен горизонтально (перпендикулярно к плоскости рисунка). Его торец находится напротив катодного узла. Поэтому торец анода обдувается потоком плазмы. На рисунке 6 представлен другой вариант расположения анода. Он ориентирован в вертикальном направлении. Поток плазмы направлен под углом вниз на поверхность торца анода.

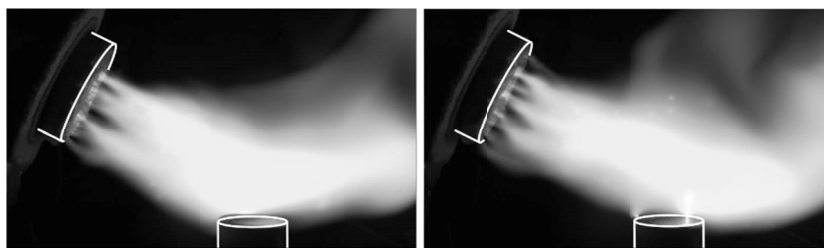


Рисунок 6. Плазменный поток, направленный под углом к торцу вертикального анода. Экспозиция 0,2 мс. $I = 8$ А

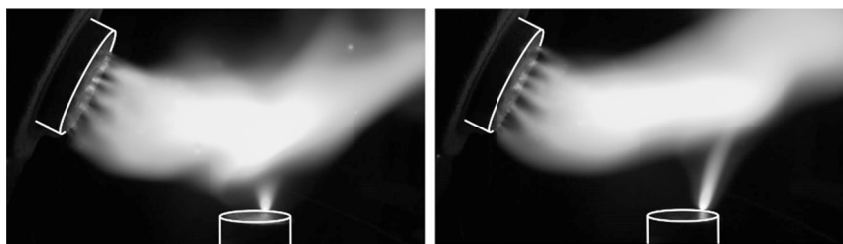


Рисунок 7. Плазменный поток при малых токах. Экспозиция 0,2 мс. $I = 5$ А

При малых токах проявляется ярко выраженная особенность с структуре газового разряда. Разряд замыкается на металлический анод в виде слаботочной электрической дуги

(рис. 7). Плазменный поток не достигает до анода. Архимедова сила, действующая на поток плазмы, поднимает его вверх и удаляет от анода. В случае горизонтального разряда эта особенность проявляется и при малых (рис. 8а), и при повышенных (рис. 8б) токах.

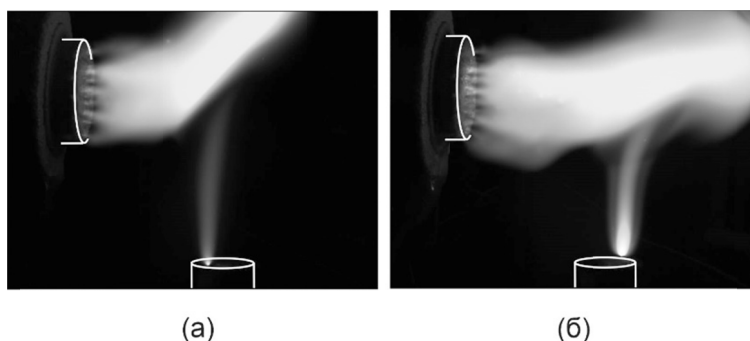
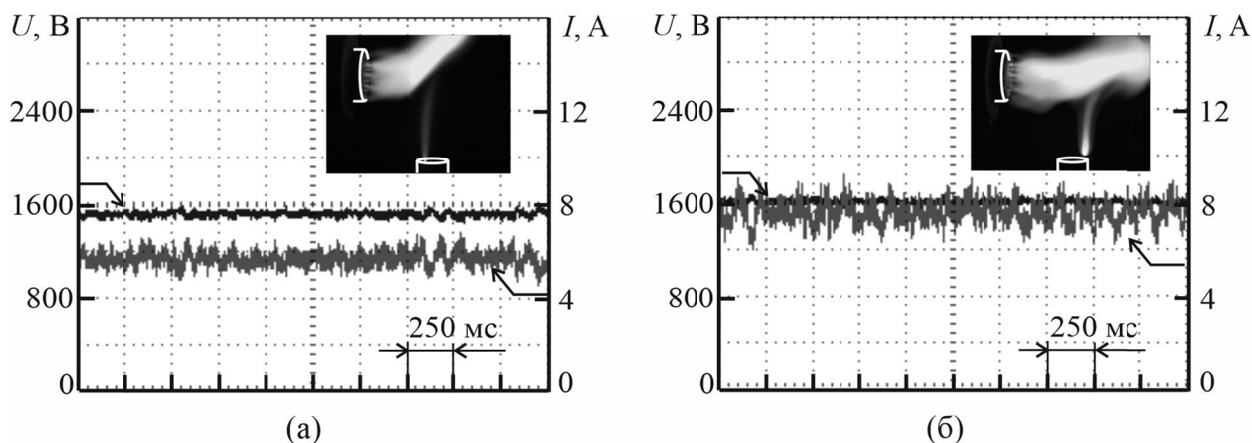


Рисунок 8. Мгновенное фото горизонтального газового разряда. Экспозиция 0,2 мс. (а) – $I = 5$ А; (б) – 8

При малых токах образуется слабый поток плазмы. Он течет практически в ламинарном режиме. Пульсации тока и напряжения незначительны (рис. 9а). При повышенных поток плазмы усиливается. Течение становится турбулентным. Амплитуды пульсаций тока растут (рис. 9б).



Выводы

Экспериментально показано, что с помощью пористой вставки на границе «разряд-жидкость» можно получить интенсивные плазменные потоки с различной ориентацией в пространстве.

Литература

1. Кашапов Р.Н. // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 4. – С. 149. – V. 1588. – P. 012012.
2. Салеева Л.Р., Кашапов Р.Н., Кашапов Л.Н., Чернышев Д.В. // Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий. – 2019. – Т. 1. – № 10. – С. 483–486.
3. Khairullin A.K., Tazmeyer V.K., Bryankin O.Y. / Progress in plasma processing of materials 1999. St. Petersburg: Tech. Univ. St. Petersburg, 1999. – P. 115.
4. Тазмеев Б.Х. // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 1999. – № 4. – С. 71.
5. Tazmeyer, Kh.K., Tazmeyer, B.Kh. // Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal. – 2003. – V. 76 (4). – P. 107.