

**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. Исрафилов**;
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

КОМБИНАЦИИ ДУГИ И РАЗРЯДА С ЖИДКИМ ЭЛЕКТРОЛИТНЫМ КАТОДОМ

Х.К. Тазмеев, Г.Х. Тазмеев

Казанский федеральный университет, Набережночелнинский институт

HKTazmeev@kpfu.ru

Аннотация

Создан и экспериментально исследован комбинированный электрический разряд, состоящий из дуги и газового разряда с жидким электролитным катодом. Исследования проведены в различных вариантах компоновки электродов. В качестве жидкого электролита были использованы водные растворы хлорида натрия с удельной электрической проводимостью 10–15 мСм/см. Ток дуги менялся в диапазоне 1–10 А. Ток газового разряда с жидким электролитным катодом устанавливался в пределах 5–10 А. Дуга и газовый разряд с электролитным катодом были привязаны на единый металлический анод.

Введение

Газовые разряды с жидким электролитным катодом представляют практический интерес как источник неравновесной плазмы атмосферного давления. Они перспективны для использования в различных плазменных процессах и технологиях. Отличительной особенностью газового разряда с жидким электролитным катодом является многоканальность в области привязки к электролиту [1–8]. При определенных условиях в объеме плазмы возникают контрагированные каналы [9, 10]. В данной работе исследована возможность образования контрагированного канала с помощью электрической дуги.

Эксперимент

Принципиальная схема экспериментальной установки изображена на рис. 1. Ее разрядный узел содержит три электрода: катод с жидким электролитом 1, металлический катод 2 и металлический анод 3. Катоды подключены к источнику питания через балластные резисторы 4 и 5.

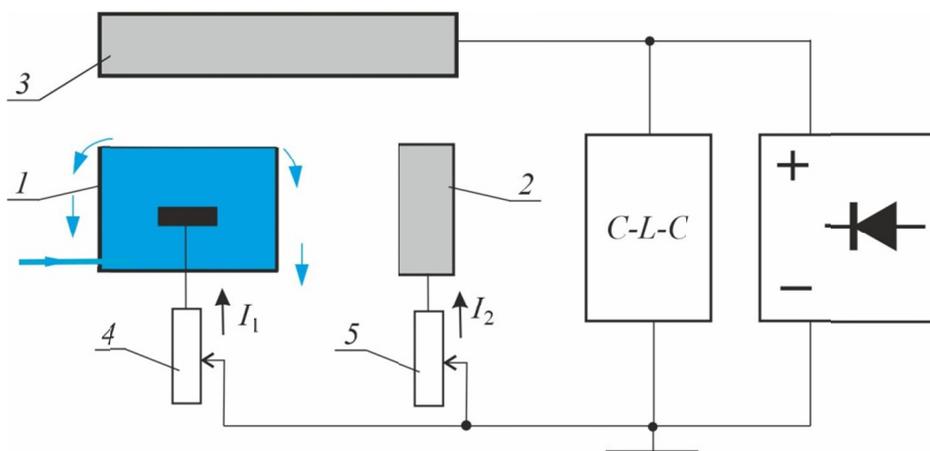


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки

Источником питания служил трехфазный двухполупериодный выпрямитель с выходным напряжением 1200–1700 В. Пульсации напряжения сглаживались C-L-C фильтром. Токи I_1 и I_2 , текущие в разрядном узле, регулировались ступенчатым изменением сопротивлений балластных резисторов 4 и 5.

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

Исследования проводились при различных вариантах расположения металлических электродов 2 и 3 относительно катода с жидким электролитом (рис. 2). Металлические электроды были изготовлены из медных стержней с диаметром 25 мм и охлаждались водой. Расстояние l между ними менялось в пределах 5–30 мм. Анод 3 устанавливался на высоте h в пределах 2–7 см.

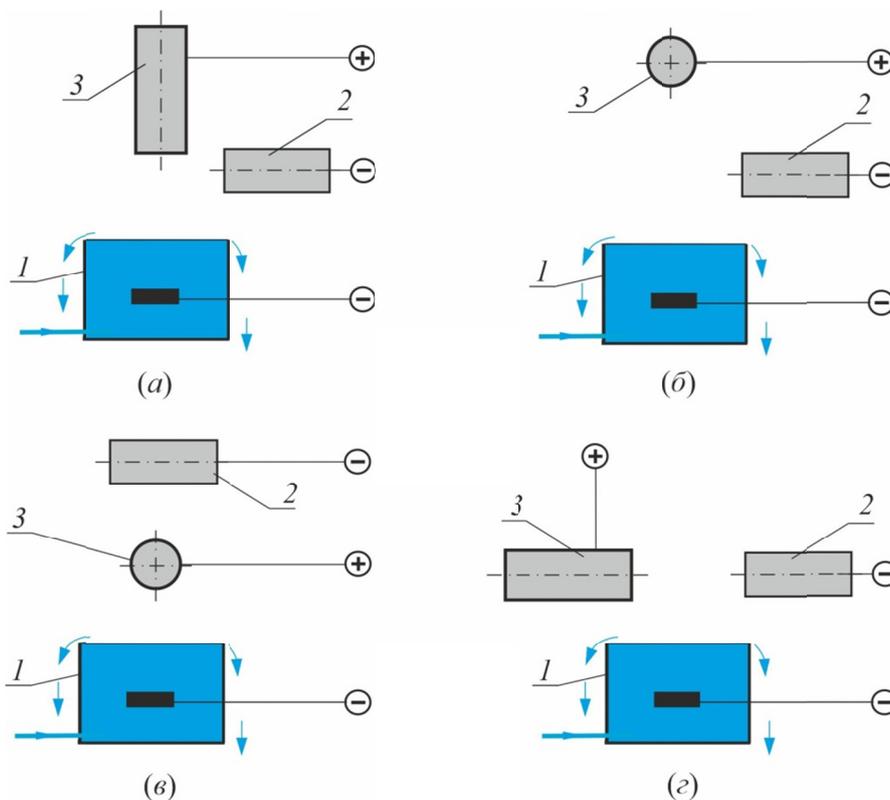


Рисунок 2. Варианты компоновки электродной системы. а – стержневые катод и анод скрещены в вертикальной плоскости; б и в – в горизонтальной плоскости на разных уровнях; г – расположены торцами напротив друг к другу

Фотографирование производилось скоростной камерой ВИДЕОСКАН-415, который позволял получить фотоснимки с минимальной экспозицией до 1 мкс.

Результаты эксперимента и их анализ

На рисунке 3 приведены мгновенные фотографии, полученные при компоновке электродов по варианту (а).

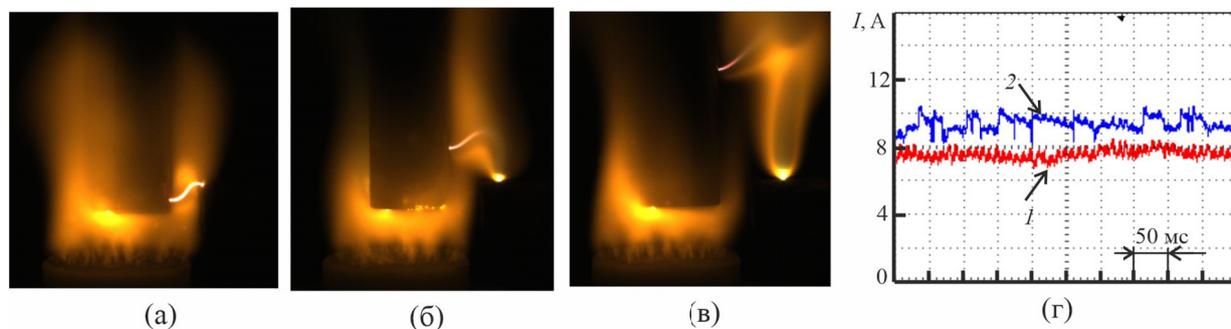
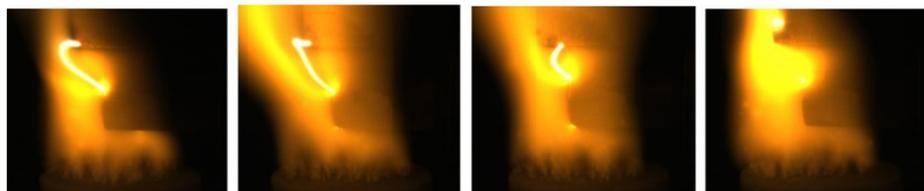


Рисунок 3. Мгновенные фотографии и осциллограммы токов. Экспозиция 0.2 мс. $h = 2$ см. $l = 5$ мм. 1 – разряд с жидким электролитным катодом, 2 – дуга

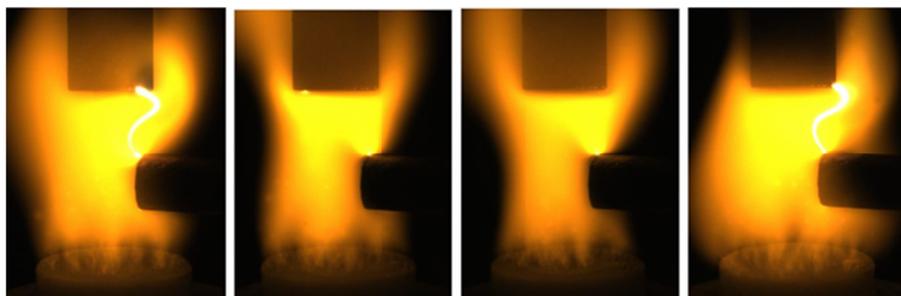
В этом варианте дуга непрерывно двигалась. Под воздействием потока плазмы и архимедовой силы она удлинялась. Анодное пятно поднималось вверх. При больших межэлектродных расстояниях l такое движение приводило к обрыву дуги. Уменьшение l привело к стабилизации горения дуги. В самом нижнем положении дуга горела, образуя короткий контрагированный канал (рис. 3а). При удлинении структура дуги менялась. Контрагированный канал сохранялся только около анода. В остальной части наблюдалось диффузное горение дуги. Ввиду хаотичных изменений длины и структуры дуги возникали пульсации тока (рис. 3г).

На рисунок 4 представлены видеок cadры, полученные в варианте (а), когда металлический катод находится в разрядном промежутке между анодом и жидким электролитным катодом. В большинстве кадров отчетливо выделяется контрагированный канал дуги.



*Рисунок 4. Последовательность видеок cadров. Металлический катод расположен между анодом и жидким электролитным катодом (вариант б).
Экспозиция 0.2 мс. $h = 4$ см. $l = 5$ мм. $I_1 = 8$ А, $I_2 = 10$ А*

При увеличении расстояния между металлическими электродами режим горения дуги меняется. На видеок cadрах контрагированный канал появляется и исчезает (рис. 5). Таким образом, в варианте (а) контрагированный канал наиболее устойчив при расположении металлического катода в разрядном промежутке между анодом и жидким электролитным катодом.



*Рисунок 5. Мгновенные фотографии разрядов при больших межэлектродных расстояниях.
Экспозиция 0.2 мс. $h = 6$ см. $l = 20$ мм. $I_1 = 8$ А, $I_2 = 10$ А*

В варианте (б) дуга горела неустойчиво. Анодное пятно смещалось, дуга удлинялась и обрывалась. При расположении анода между двумя катодами (вариант в) также происходило удлинение дуги. Однако, несмотря на это режим горения дуги был непрерывным.

В варианте (г) опыты также проводились при расположении металлического катода на разных уровнях: ниже анода, на одном уровне с анодом и выше него. Во всех этих случаях наблюдалось непрерывное горение дуги с образованием контрагированного канала. На рисунке 6 приведены видеок cadры и осциллограммы токов, полученные при расположении металлического катода выше анода. Как и в других вариантах, фиксировались пульсации тока.

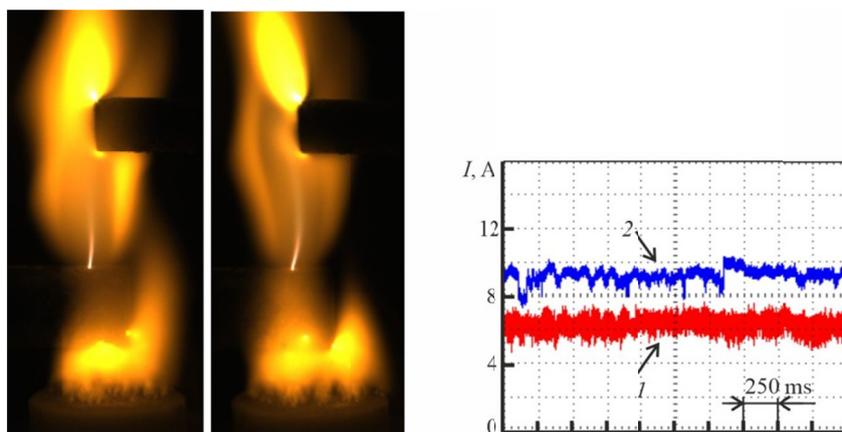


Рисунок 7. Мгновенные фотографии разрядов и осциллограммы токов в варианте (г).
 Металлический катод расположен выше анода. Экспозиция 0.2 мс. $l_1 = 60$ мм. $l_2 = 30$ мм.
 1 – разряд с жидким электролитным катодом, 2 – дуга

При сближении металлических электродов на расстояние менее 10 мм дуга горела с образованием только контрагированного канала без диффузного участка. Пульсации тока становились еще слабее.

Выводы

Таким образом, поток плазмы способствует образованию контрагированного канала в лаботочной дуге в диапазоне 1–10 А. Образование устойчивого контрагированного канала наблюдается в варианте горизонтально ориентированного анода. Дуга переходит полностью в контрагированный режим горения при сближении электродов на расстояние менее 10 мм.

Литература

1. Lu X., Laroussi M. // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2003. – V. 36. – P. 661–665.
2. Bagautdinova L.N., Gaisin F.M. // High Temperature. – 2010. – V. 48. – P. 126–128.
3. Orejas J., Hazel N., Ray S. // Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy. – 2021. – V. 181. – P. 106209.
4. Bruggeman P., Walsh J.L., Schram D.C., Leys C., Kong M.G. // Plasma Sources Science and Technology. – 2009. – V. 18 (4). – P. 045023.
5. Cserfalvi T., Mezei P., Apai P. // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1993. – V. 26. – P. 2184–2188.
6. Tazmeev G.K., Timerkaev B.A., Tazmeev K.K. // J. Phys.: Conf. Ser. – 2017. – V. 789. – P. 012059.
7. Tazmeeva R.N., Tazmeev B.K. // 2019 J. Phys.: Conf. Ser. – 2019. – V. 1328. – P. 012074.
8. Tazmeev Kh.K., Arslanov I.M., Tazmeev G.Kh. // J. Phys.: Conf. Ser. – 2016. – V. 669. – P. 012058.
9. Tazmeev Kh.K., Tazmeev A.Kh. // J. Phys.: Conf. Ser. – 2014. – V. 567. – P. 012035.
10. Tazmeev G.K., Timerkaev B.A., Tazmeev A.K. // J. Phys.: Conf. Ser. – 2017. – V. 927. – P. 01206.