

**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

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА В ГАЗОВОМ РАЗРЯДЕ С ЖИДКИМ ЭЛЕКТРОЛИТНЫМ КАТОДОМ

Р.Н. Тазмеева¹, Б.Х. Тазмеев²

*¹Казанский (Приволжский) федеральный университет,
Набережночелнинский институт*

*²Кубанский государственный технологический университет
tazmееva@mail.ru*

Аннотация. Получены и исследованы плазменные потоки в виде плоской вертикальной стенки. Разряд зажигался в открытой воздушной атмосфере в диапазоне токов 2–15 А. Показана возможность формирования потока плазмы с параметрами, приемлемыми для энергоемких технологий.

Введение

Плазменные потоки, образуемые из жидкофазных электролитов, обладают большими потенциальными возможностями практического применения [1–8]. Мощные плазменные могут быть созданы с помощью газовых разрядов в токовом диапазоне в десятки ампер [9–10]. В традиционном варианте газовый разряд зажигается в вертикальном разрядном промежутке между жидким электролитным катодом и металлическим анодом. При этом металлический анод располагается в потоке плазмы и к нему отводится значительная часть тепловой энергии потока плазмы. Потери тепла на аноде составляют в среднем порядка 20 % от вкладываемой в разряд мощности [11]. В данной работе проведены исследования с целью снижения потерь тепла на металлическом аноде.

Эксперимент

В экспериментальной практике газовый разряд с жидким электролитным катодом создают, применяя различные жидкостные системы. В открытом воздухе при атмосферном давлении, как правило, электролит либо наливается в емкость с большим геометрическим объемом и циркулирует через него, либо истекает из трубки. В таких вариантах разряд формируется в виде тела цилиндрической формы. В данной работе электролит истекал из щелевого зазора. При этом разряд формировался в виде вертикальной светящейся стенки сравнительно малой толщины.

Экспериментальное устройство, использованное для создания и изучения газового разряда, схематично изображено на рис. 1. Там же представлен фотоснимок устройства.

Корпус (1) катодного узла был изготовлен из стеклотекстолита. Внутри него был смонтирован медный стержень (2). К этому стержню подводился отрицательный потенциал от источника питания. Жидкий электролит подавался во внутреннюю полость катодного узла через отверстие (3), и он вытекал из узкой щели (4). Длина щели составляла 22 см, а ширина – 3 мм. На краях зазора были выполнены буртики высотой 5 мм. Над катодным узлом располагался анод (5). Он был изготовлен из медной трубы диаметром 14 мм. Анод охлаждался водой, пропускаемой через трубу. Опыты проводились при различных расположениях анода. Высота h менялась в пределах от 2 до 10 см. Горизонтальное смещение x достигало 3,5 см.

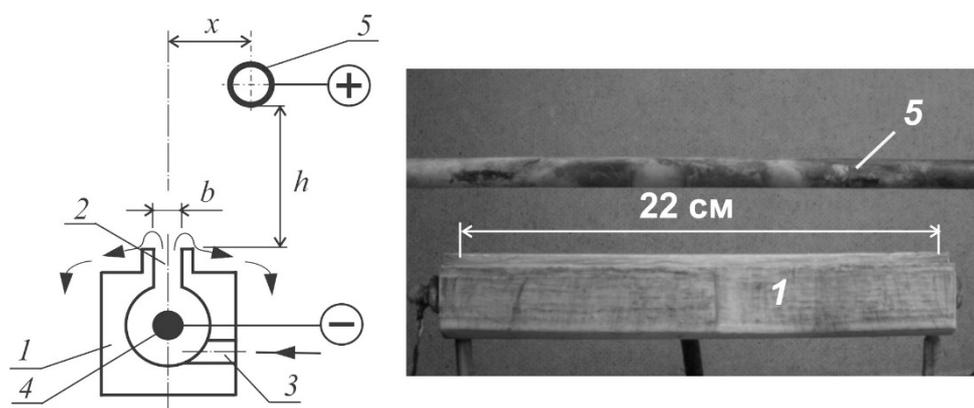


Рис. 1. Экспериментальная установка (узел электрического разряда)

В качестве электролита использовались растворы хлорида натрия в дистиллированной воде с различными концентрациями. Удельная электрическая проводимость электролитов была в пределах от 5 до 12 мСм/см. Массовый расход электролита m через щель составлял 5–30 г/с. Источником питания служил трехфазный двухполупериодный выпрямитель. Пульсации напряжения сглаживались $C-L-C$ -фильтром.

Фотографирование производилась скоростной камерой ВИДЕОСКАН-415, которая позволяла получить фотоснимки с минимальной экспозицией до 1 мкс.

Тепловые потери на электродах (на катоде и аноде) определялись calorиметрическим способом.

Результаты эксперимента и их анализ

На рис. 2 и 3 приведены фотоснимки газового разряда при ненулевом горизонтальном смещении анода. При фотографировании объектив камеры был направлен вдоль щели на катоде. Экспозиция составляла 200 мкс. Как видно, при малых токах плазменный столб располагается вертикально над щелью. Анод практически полностью находится вне плазменного столба. Вблизи анода образуется разрядный канал в виде шнура. Под воздействием архимедовой силы шнур изгибается, принимая форму дуги. Разрядный шнур во время горения разряда непрерывно менялся. Плазменный столб также непрерывно менял свою форму.

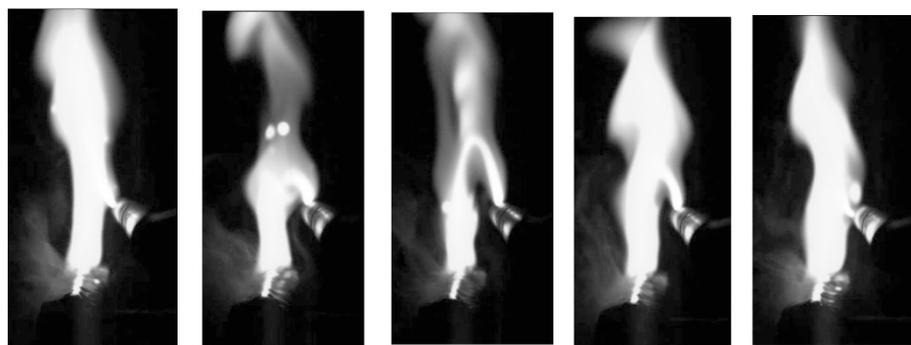


Рис. 2. Плазменный столб при разрядном токе 6 А. $x = 3,0$ см; $h = 5,0$ см

При увеличении тока плазменный столб становится толще и касается краем анода (рис. 3). Вблизи анода появляются тонкие искровые каналы.

Опыты показали, что газовый разряд горит при небольших смещениях x анода от центрального положения. В исследованном диапазоне параметров максимальное смещение было в пределах 3,0–3,5 см.



Рис. 3. Плазменный столб при разрядном токе $I = 13$ А. $x = 2,5$ см; $h = 3,5$ см

На рис. 4 приведены мгновенные фотоснимки плазменного столба, полученные при направлении объектива камеры перпендикулярно узкой щели на катоде (соответственно, перпендикулярно аноду).

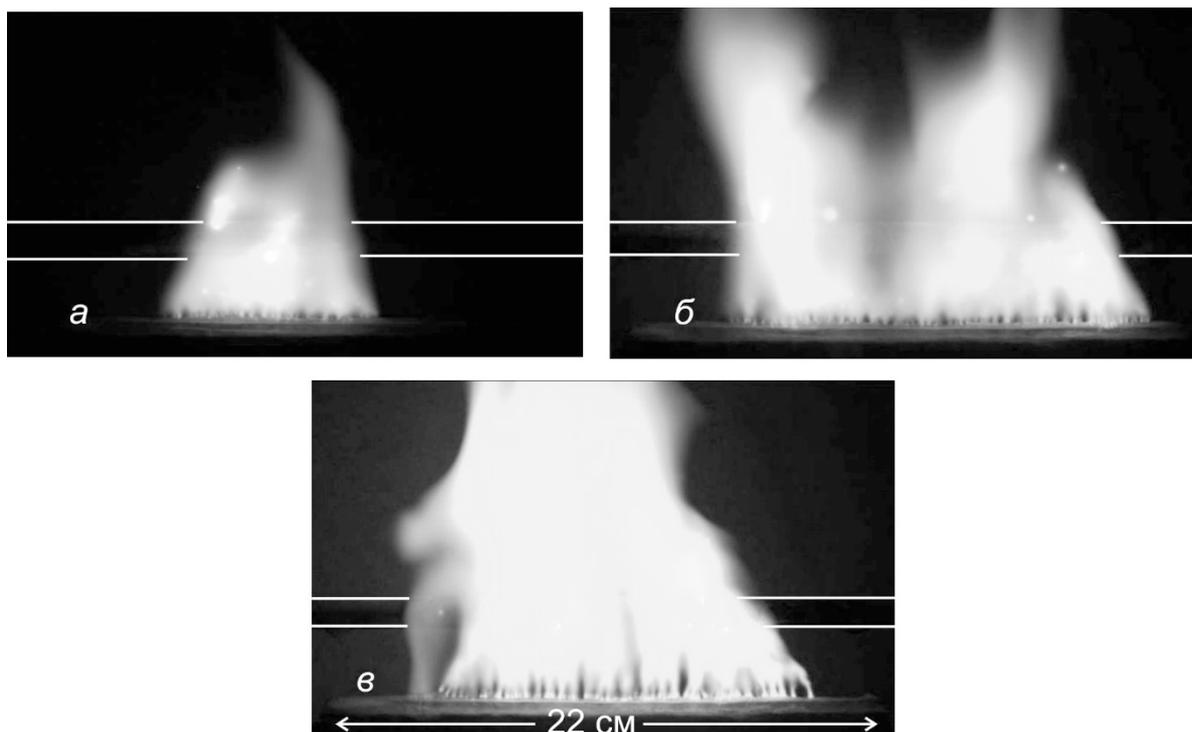


Рис. 4. Плазменный поток в виде вертикальной стенки. Анод находится на заднем плане. Его очертания обозначены белыми линиями. Разрядный ток: а) $I = 5$ А; б) 12 А; в) 15 А. $x = 2,5$ см; $h = 4,0$ см

Как видно, при повышении тока зона привязки разряда к воднорастворному катоду расширяется вдоль щели. На поверхности водного раствора образуются точечные опорные пятна. Свечение опорных пятен усиливается при увеличении тока. При этом количество видимых пятен заметно уменьшается. Кроме того, меняется пространственная структура плазменного столба в прикатодной области. Плазменный

столб в этой области становится явно неоднородным. В нем появляются светящиеся столбики, которые упираются на опорные пятна. Дальнейшее повышение тока в опытах приводило к гашению газового разряда. При этом водный раствор, используемый в качестве катода, нагревался до кипения. В качестве примера в табл. 1 приведены значения температур водного раствора на выходе из катодного узла при различных разрядных токах.

Таблица 1

Зависимость температуры водного раствора от тока			
Разрядный ток, А	5	11	14
Температура водного раствора, °С	69	82	93

На рис. 5 представлены тепловые потери на аноде Q_A . Видно, что смещение анода от центрального положения способствует значительному снижению тепловых потерь.

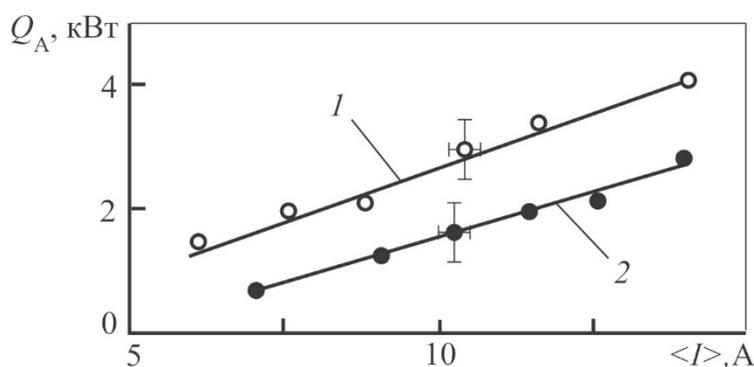


Рис. 5. Тепловые потери на аноде.
Смещение от центрального положения: 1 – $x = 0$ см; 2 – 2,5 см

Выводы

Для формирования потока плазмы в виде вертикальной стенки необходимо обеспечить истечение воднорастворного катода из длинной узкой щели вверх. При этом водный раствор не должен нагреваться до кипения.

Смещение анода от центрального положения способствует снижению тепловых потерь.

Литература

1. Bruggeman P.J. et al. // Plasma Sources Sci. Technol. – 2016. – Vol. 25. – P. 053002.
2. Фридланд С.В., Тазмеев А.Х., Мифтахов М.Н., Тазмеев Х.К. // Вестник машиностроения. – 2006. – № 7. – С. 72–73.
3. Фридланд С.В., Тазмеев А.Х., Мифтахов М.Н. // Вестник Казанского технологического университета. – 2006. – № 6. – С. 10–15.
4. Тазмеев А.Х., Фридланд С.В., Мифтахов М.Н. // Вестник Казанского технологического университета. – 2006. – № 6. – С. 43–46.
5. Тазмеева Р.Н., Зиганшин Р.Р., Тазмеев Х.К. // Вестник машиностроения. – 2008. – № 10. – С. 87.
6. Tazmeev A.K., Tazmeeva R.N. // J. Phys.: Conf. Ser. – 2017. – Vol. 789. – P. 012058.

7. Gibadullina G.R., Tazmeev A.H., Tazmeeva R.N. // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. – Vol. 10 (24). – P. 45015–45021.
8. Shakirov Yu.I., Valiev R.I., Khafizjv A.A., Valiev R.A., Khakimov R.G. // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 669. – Is. 1. – 012064.
9. Tazmeev Kh.K., Tazmeev A.Kh. // Heat Transfer Research. – 2005. – Vol. 36. – № 8. – P. 623–629.
10. Tazmeev Kh.K., Arslanov I.M., Tazmeev G.Kh. // J. Phys.: Conf. Ser. – 2014. – Vol. 567. – 012001.
11. Мифтахов М.Н., Тазмеев Х.К., Тазмеев А.Х., Фридланд С.В. // ИФЖ. – 2006. – Т. 79. – № 3. – С. 109–115.