

**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 ПОТОКА ПЛАЗМЫ НА СВОЙСТВА СЛАБОТОЧНОЙ ДУГИ В ОТКРЫТОЙ АТМОСФЕРЕ

Г.Х. Тазмеев¹, А.Х. Тазмеев¹, Б.Х. Тазмеев²

¹Казанский федеральный университет, Набережночелнинский институт

²Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина

GHTazmeev@kpfu.ru

Аннотация

Экспериментально исследованы электрические и оптические свойства слаботочной дуги, которая обдувалась потоком плазмы от газового разряда с жидким электролитным катодом. Ток дуги менялся в диапазоне 1–10 А. В качестве жидкого электролита были использованы водные растворы хлорида натрия с удельной электрической проводимостью 10–15 мСм/см. Дуга и газовый разряд с электролитным катодом были привязаны на единый металлический анод.

Введение

Исследования открытой дуги имеют давнюю историю. Первые опыты с электрической дугой проводились в открытой атмосфере (Петров, Дэви и Риттер) [1, 2]. В опытах зажигалась дуга в сильноточном режиме. В настоящее время такой режим горения открытой дуги изучен достаточно подробно. Исторически сложилось так, что слаботочные режимы горения оставались малоисследованными. Некоторые особенности слаботочных режимов горения рассмотрены в статьях [3, 4]. В целом, на сегодняшний день накоплен достаточно обширный экспериментальный материал. Однако полученных сведений явно недостаточно для того, чтобы построить в полном объеме физическую картину процессов в слаботочной дуге.

Эксперимент

Экспериментальная установка схематично изображена на рис. 1.

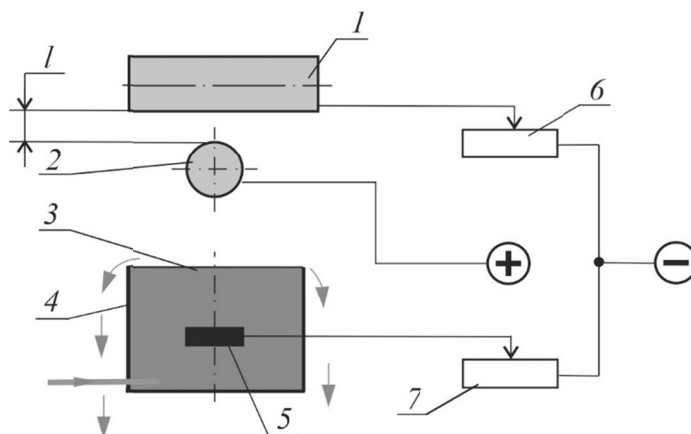


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки

Электрическая дуга зажигалась между металлическими электродами 1 и 2. Они были изготовлены из медных стержней с диаметром 25 мм и охлаждались водой. Межэлектродное расстояние l менялось в пределах 5–30 мм. Плазменный поток создавался с помощью газового разряда, который зажигался между жидким электролитом 3 и металлическим электродом 2. Электролит 3 истекал из сосуда 4. Он служил катодом. Потенциал к нему подводился

от графитового электрода 5. Металлический электрод 2 служил анодом и для дуги, и для газового разряда с жидким электролитным катодом. Токи регулировались ступенчатым изменением сопротивлений резисторов 6 и 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.

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

Спектроскопия газового разряда осуществлялась высокоскоростным оптоволоконным спектрометром AvaSpec-3648 в диапазоне длин волн 484–708 нм с разрешением 0.15 нм (дифракционная решетка 1200 штрихов/мм, входная оптическая щель 10 мкм).

Результаты эксперимента и их анализ

На рисунке 2 приведены мгновенные фотографии дуги, полученные при отсутствии потока плазмы.

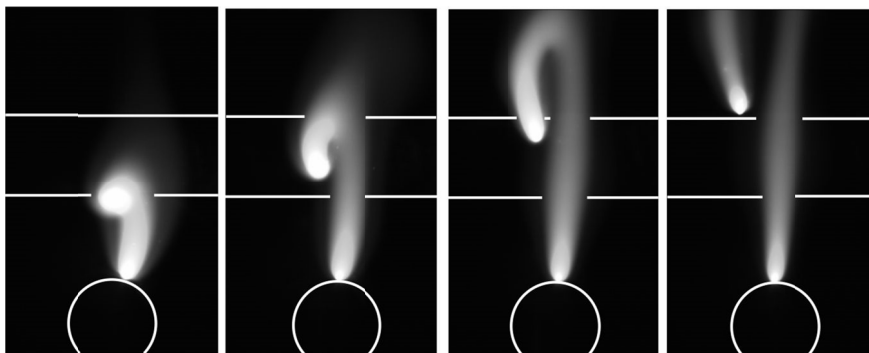


Рисунок 2. Последовательность состояний электрической дуги в пространстве.

Экспозиция 0,2 мс. $l = 25$ мм.

Белыми линиями обозначены контуры металлических электродов

Под воздействием архимедовой силы дуга изгибается и удлиняется в вертикальном направлении вверх. При этом ее токовой канал сужается, что заметно по снижению интенсивности излучения. В итоге дуга обрывается и гаснет. При малых межэлектродных расстояниях процесс несколько усложняется. Удлинение дуги прерывается шунтированием. Такой процесс достаточно подробно описан в работе [5].

На рисунке 3 представлены осциллограммы тока и напряжения для режима горения с шунтированием.

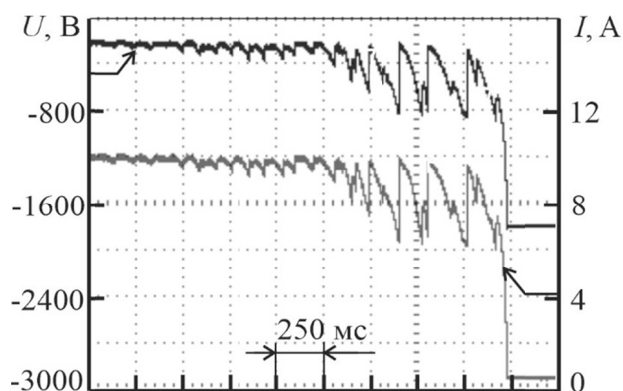
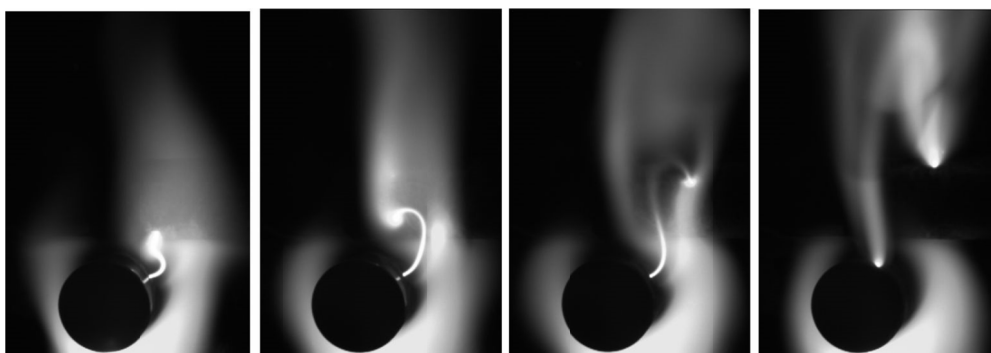


Рисунок 3. Осциллограммы тока и напряжения свободной дуги

при отсутствии потока плазмы. $l = 5$ мм

На рисунке 4 приведены видеок cadры, полученные при обдуве дуги потоком плазмы от газового разряда с жидким электролитным катодом.



Рисунке 4. Электрическая дуга в потоке плазмы. Экспозиция 0,2 мс. $l = 5$ мм

Как и в случае отсутствия потока плазмы, дуга удлиняется. Однако в данном случае она не обрывается и не гаснет. Дуга горит непрерывно. При этом его геометрия хаотично меняется. В токовом шнуре образуется контрагированный канал с ярким свечением алого цвета. При удлинении дуги свечение ослабевает, и контрагированный канал практически исчезает. Ток шнур становится диффузным. Случайные изменения формы и размеров токового шнура приводят к пульсациям тока и напряжения дуги (рис. 5).

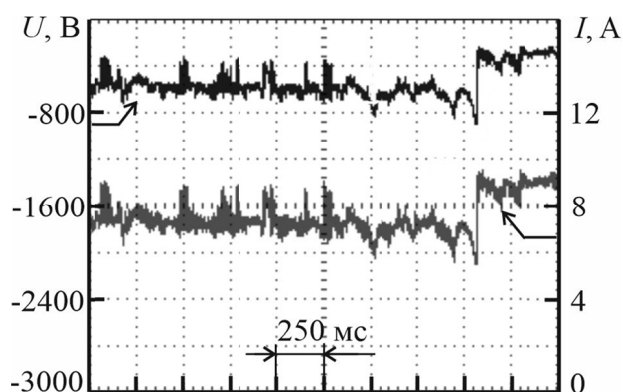


Рисунок 5. Осциллограммы тока и напряжения дуги при ее обдуве потоком плазмы от газового разряда с жидким электролитным катодом. $l = 5$ мм

На рисунке 6 представлен спектр излучения в видимой области длин волн для одного из случайных состояний электрической дуги. Примечательно то, что присутствуют бальмеровские линии водорода H_α (656,3 нм) и H_β (486,1 нм). Происходит интенсивное излучение на длине волны 656,3 нм. Поэтому наблюдается алая окраска канала дуги на видеок cadрах (рис. 4). Атомы водорода поступают из состава водного раствора, используемого в качестве электролита. Оттуда же идут и атомы натрия. D линия натрия настолько интенсивная, что вблизи этой линии происходит насыщение пикселей спектрометра.

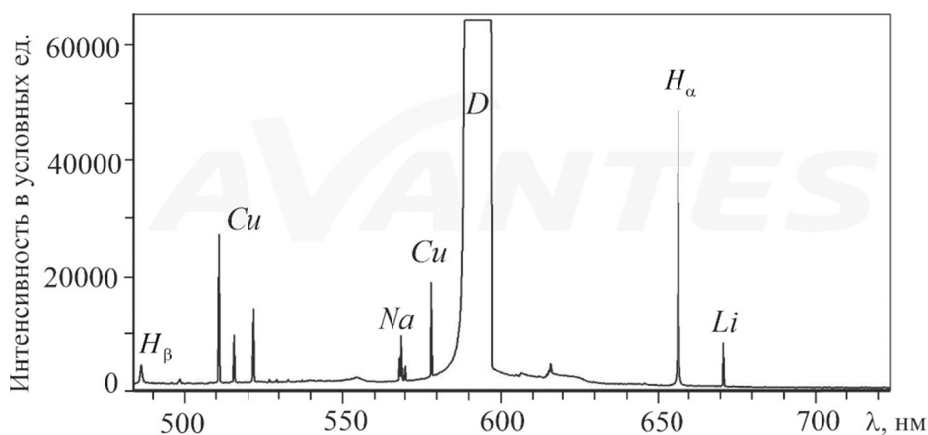


Рисунок 6. Обзорный спектр в видимой области излучения

Присутствие бальмеровских линий H_α и H_β позволило рассчитать электронную температуру T_e и концентрацию электронов n_e . Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Температура и концентрация электронного газа

	$\Delta\lambda/2(H_\alpha)$ (нм)	$\Delta\lambda/2(H_\beta)$ (нм)	n_e (10^{15} см^{-3})	T_e (К)
1	0.218	0.413	2.97	3750
2	0.211	0.497	3.92	3630
3	0.186	0.413	2.97	3750
4	0.208	0.471	3.70	3990

Электронная температура T_e рассчитывалась по методу относительных интенсивностей [1]. Расчет концентрации электронов n_e был выполнен с использованием методики, рекомендованной в [6] для диапазона температур $(5-40) \cdot 10^3$ К. Поскольку результаты расчетов не входят данный диапазон, то они могут быть приняты лишь в качестве нулевого приближения. Тем не менее, можно отметить, что полученные результаты хорошо согласуются с данными для слаботочной аргоновой дуги [1].

Выводы

Поток плазмы стабилизирует открытую электрическую дугу. В потоке плазмы она горит непрерывно, не затухая. В токовом шнуре дуги образуется контрагированный канал. Он развивается со стороны металлического анода.

Литература

1. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987.
2. Финкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма: пер. с нем. / под. ред. Фабриканта В.А. – М.: ИЛ, 1961.
3. Risacher A., Larigaldie S., Bobillot G., Marcellin J-P., Picard L. // Plasma Sours Sci. Technol. – 2007. – V. 16. – P. 200.
4. Архипенко В.И., Згировский С.М., Кириллов А.А., Симончик Л.В. // Физика плазмы. – 2002. – Т. 28. – № 10. – С. 930.
5. Тазмеев Х.К., Тазмеев Б.Х. // Физика плазмы. – 2016. – Т. 42, № 1. – С. 1–5.
6. Очкин В.Н. Спектроскопия низкотемпературной плазмы. – М.: Физматлит, 2006.