

АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН  
НАУЧНЫЙ СОВЕТ РАН ПО КОМПЛЕКСНОЙ ПРОБЛЕМЕ  
«ФИЗИКА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ»  
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КАЗАНСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»  
КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
КАЗАНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
КАЗАНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. А.Н. ТУПОЛЕВА – КАИ

# **НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПЛАЗМА В ПРОЦЕССАХ НАНЕСЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ**

**XV Международная  
научно-техническая конференция**

Казань, 22-24 ноября 2023 г.

Сборник статей

**КАЗАНЬ  
2024**

УДК 5  
ББК 22  
Н61

**Оргкомитет:**

**Кашапов Н.Ф.** – доктор технических наук,  
член-корреспондент АН РТ (**председатель**);  
**Кашапов Р.Н.** – кандидат технических наук (**ученый секретарь**);  
**Лучкин А.Г.** – кандидат технических наук;  
**Фадеев С.А., Кашапов Л.Н., Семенова Е.В., Чебакова В.Ю.**

**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;  
**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. XV Международная научно-техническая конференция (Казань, 22-24 ноября 2023 г.): сб. статей. – Казань: Издательство АН РТ, 2024. – 120 с.**

**ISSN 2312-2285**  
**ISBN 978-5-9690-1268-4**

Сборник содержит материалы XIV 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, Научный совет РАН по комплексной проблеме «Физика низкотемпературной плазмы», Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ.

**УДК 5**  
**ББК 22**

**ISSN 2312-2285**  
**ISBN 978-5-9690-1268-4**

© Коллектив авторов, 2024

## НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО СОЗДАНИЮ МОЩНОГО ПОТОКА ПЛАЗМЫ ОТ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА С ЖИДКИМ ЭЛЕКТРОЛИТНЫМ КАТОДОМ

Г.Х. Тазмеев<sup>1</sup>, А.Х. Тазмеев<sup>1</sup>, Д.А. Вальтеев<sup>1</sup>, А.А. Калеева<sup>2</sup>, Х.К. Тазмеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский федеральный университет, Набережночелнинский институт

<sup>2</sup>Казанский национальный исследовательский технический университет

им. А.Н. Туполева

e-mail: GKTazmeev@kpfu.ru

Проведены исследования по получению потока плазмы с мощностью в десятки киловатт. Особенностью является то, что плазменный поток сформирован от газового разряда с жидким электролитным катодом, который горит в направлении, близком к горизонтальному. Разработан катодный узел, с помощью которого меняется пространственная ориентация газового разряда. Исследован процесс формирования потока плазмы в условиях горения газового разряда внутри камеры со стенками из огнеупорного материала.

**Ключевые слова:** газовый разряд, электролитный катод, поток плазмы.

### Введение

Газовые разряды с жидкими электролитными электродами перспективны для многих практических приложений [1-3]. Они используются в технологиях обеззараживания воды, синтезе различных функциональных материалов, плазменной активации жидких реагентов. Область их применения продолжает расширяться. Жидкий электролит, используемый в качестве катода, подвергается интенсивному тепловому воздействию. Электролит испаряется, распыляется, частично поступает в разрядную область и участвует в образовании плазмы. В сильноточных режимах в плазменный столб поступает значительное количество вещества из жидкого катода. Разряд горит в парогазовой среде. Поэтому мощные газовые разряды с жидким электролитным катодом могут быть рассмотрены наряду с дуговыми плазмотронами как источники энергоносителей в плазмохимических процессах, в частности, в плазменной газификации углеродсодержащего сырья. К примеру, в работе [4] показана приемлемость газового разряда с жидким электролитным катодом для переработки отходов полимерных материалов. Однако способы формирования мощных плазменных потоков в газовых разрядах с жидкими электролитными электродами еще далеки от совершенства. Возникают вопросы, связанные с конструктивным исполнением генератора плазмы, вводом реагентов в плазму и т.д.

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 работе [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. При такой ориентации газового разряда существенно проще становится ввод жидких и твердых реагентов в поток плазмы. В связи с этим, целью данной работы явилось разработка катодного узла с пористой вставкой для создания потока плазмы с мощностью в десятки киловатт.

### Катодный узел с пористой вставкой

На рис. 1а схематично изображен катодный узел. Его конструктивной особенностью является то, что он снабжен пористой вставкой 3, выполненной из огнеупорного материала. Пористость составляет около 60 %. Пористая вставка 3 имеет толщину  $b = 5$  мм. Для увеличения пропускной способности она перфорирована. В ней выполнены отверстия 5 с диаметром 0,3 мм. Электролит протекает по зазору, образованному между графитовым токоподводом 2 и пористой вставкой 3. Ширина зазора  $\Delta = 1$  мм. Часть электролита вытекает через перфорационные отверстия 5. Частично электролит просачивается через пористое тело вставки 3. Электролит, выступающий на наружную поверхность, становится жидким катодом. На рис. 1б приведено фото разряда, полученного с использованием данного катодного узла.

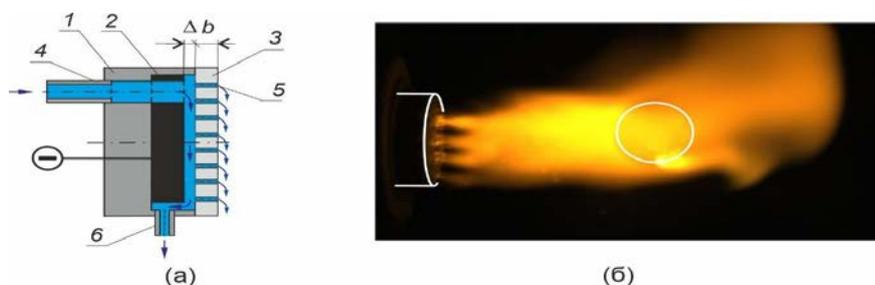


Рисунок 1. Катодный узел (а) и фото газового разряда (б).

1 – корпус; 2 – токоподвод; 3 – пористая вставка; 4 – штуцер подвода электролита; 5 – перфорационное отверстие; 6 – штуцер отвода электролита. На фото белыми линиями обозначены контуры катодного узла и торца цилиндрического анода.

### Экспериментальная установка и методы исследований

На рис. 2 представлена схема экспериментальной установки для исследования газового разряда.

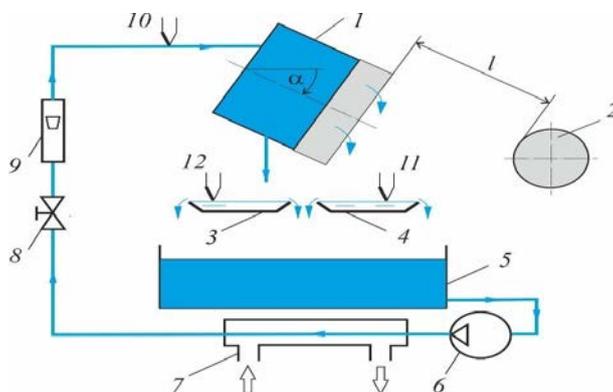


Рисунок 2. Схема экспериментальной установки.

1 – катодный узел; 2 – анод; 3 и 4 – кюветы; 5 – резервуар; 6 – гидронасос; 7 – теплообменник; 8 – вентиль; 9 – ротаметр; 10, 11 и 12 - термопары.

Катодный узел  $1$  устанавливался под различными углами  $\alpha$  к горизонту. Межэлектродное расстояние  $l$  менялось в пределах 3-7 см. Анод  $2$  был изготовлен из медного стержня с диаметром 25 мм, и он охлаждался водой. Электролит циркулировал с помощью гидронасоса  $6$  через теплообменник  $7$ . Расход электролита  $m$  через катодный узел устанавливался с помощью вентиля  $8$  и контролировался поплавковым ротаметром  $9$ . В катодном узле течение электролита разделялось на два потока: внутренний (по зазору) и наружный (текущий по наружной поверхности пористой вставки). Массовые скорости этих потоков, соответственно  $m_1$  и  $m_2$ , определялись отдельно. Внутренний и наружный потоки электролита стекали в разные мерные емкости. Измерения проводились не менее 5 раз в каждом токовом режиме ( $I = const$ ) горения разряда. Продолжительность горения разряда в режимах  $I = const$  составляла 10 минут. Фиксировалась убыль электролита, которая происходила за это время в гидросистеме. Вычислялась массовая скорость убыли электролита  $G$ . Она принималась за массовую скорость потока плазмы.

Мощности тепловых потерь на нагрев электролита определялись калориметрическим методом.

$$Q_1 = c \cdot m_1 \cdot \Delta t_1; \quad (1)$$

$$Q_2 = c \cdot m_2 \cdot \Delta t_2. \quad (2)$$

Жидким электролитным катодом служили водные растворы хлорида натрия с удельной электрической проводимостью  $\sigma$  в пределах 10-15 мСм/см. Такие водные растворы наиболее полно удовлетворяют требованиям к электролитному катоду в сильноточных режимах горения разряда.

Источником питания служил трехфазный двухполупериодный выпрямитель с напряжением на выходе 2100 В.

### Результаты экспериментов и их анализ

Вольтамперные характеристики газоразрядного устройства получились возрастающими (рис. 3а). Такой результат является положительным фактором, т.к. способствует стабильному горению разряда. При этом в цепи электрического питания можно не использовать балластный резистор. Соответственно, можно снизить потери энергии.

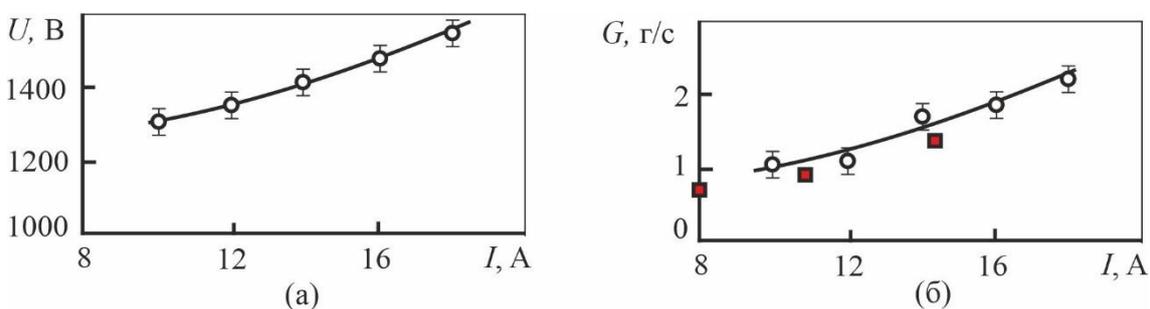


Рисунок 3. Вольтамперная характеристика (а) и зависимость массовой скорости убыли электролита от тока.  $m = 15$  г/с;  $\alpha = 15^\circ$ ;  $l = 6$  см. Закрашенные квадраты – [6].

Как и ожидалось при повышении тока массовая скорость убыли электролита увеличивалась практически линейно (рис. 3б). Такая закономерность фиксируется в сильноточных режимах горения разряда [6]. Влияние пористой вставки на

убыль электролита незначительно. Это видно из сравнения полученных результатов с экспериментальными данными работы [6].

Несколько неожиданный результат был получен при измерениях расхода электролита через катодный узел во время горения разряда. Оказалось, что разрядный ток влияет на течение электролита внутри катодного узла. Как видно из графиков, представленных на рис. 4а, при повышении тока массовая скорость внутреннего потока уменьшалась, а наружного потока – увеличивалась. Возможно, причиной такого перераспределения потоков электролита является выделение газообразного водорода на поверхности графитового токоподвода.

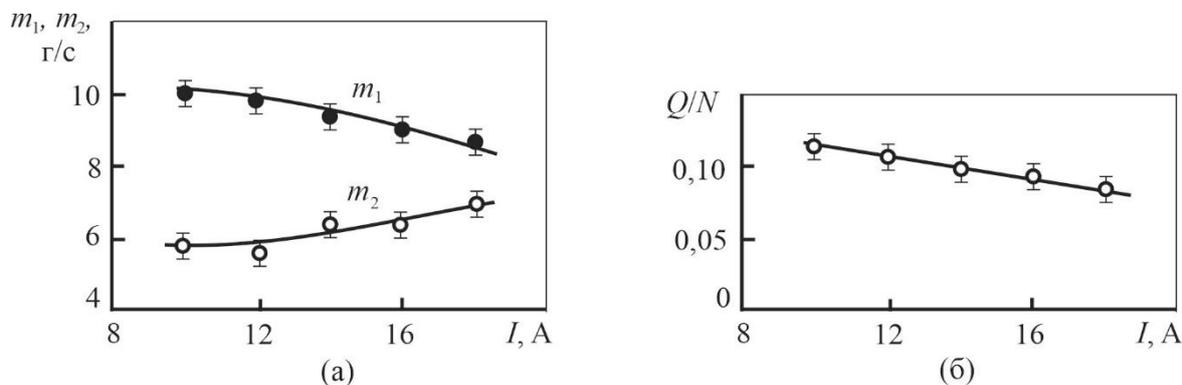


Рисунок 4. Массовые скорости внутреннего ( $m_1$ ) и наружного ( $m_2$ ) потоков электролита (а) и отношение тепловых потерь на катоде к полной мощности (б).

Наружный поток электролита нагревался сильнее, чем внутренний. Соответственно, потери тепла на нагрев электролита в наружном потоке получились намного больше, чем во внутреннем. При этом суммарная мощность тепловых потерь  $Q$  через катодный узел была сравнительно мала. В исследованном диапазоне токов она составляла небольшую часть мощности, затрачиваемой на создание разряда (рис. 4б). К примеру, при  $I = 16$  А потери через катод не превышали десятой доли от общей мощности разряда  $N$ . При повышении тока доля потерь тепла через катод уменьшалась в энергетическом балансе.

### Выводы

Получен поток плазмы с мощностью в пределах 15-25 кВт. Экспериментально показана возможность изменения ориентации плазменного потока в пространстве с применением пористой вставки на катодном узле. Установлены закономерности нагрева электролита в катодном узле с пористой вставкой.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - МК-111.2022.1.2.

### Литература

1. Mezei P., Cserfalvi T. Electrolyte cathode atmospheric glow discharges for direct solution analysis. Applied Spectroscopy Reviews. – 2007. – V. 42. – P. 573–604
2. Хлюстова А. В., Сироткин Н. А., Титов В. А., Кузьмичева Л. А. // Прикладная физика. – 2016. – № 6. – С. 25-31.