

**АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН
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**

**XI Международная
научно-техническая конференция**

Казань, 6–9 ноября 2019 г.

Сборник статей



**КАЗАНЬ
2020**

УДК 5
ББК 22
Н61

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;
Шайдуллин Л.Р. – кандидат физико-математических наук;
Фадеев С.А.; 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. XI Международная научно-техническая конференция** (Казань, 6–9 ноября 2020 г.): сб. статей. – Казань: Издательство Казанского университета, 2019. – 348 с.

ISSN 2312-2285

Сборник содержит материалы XI 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, 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

© Издательство Казанского университета, 2020

3. Одишария, Г.Э. Прикладная гидродинамика газожидкостных систем (Всероссийский НИИ природных газов и газовых технологий): учебник / Г.Э. Одишария, А.А. Точигин. – Иваново: Ивановский гос. технический ун-т. 1998. – 400 с.
4. Сафонов, В.С. Теория и практика в газовой промышленности: учебное пособие / В.С. Сафонов, Г.Э. Одишария, А.А. Швыряев. – М.: НУМЦ Минприроды России, 1996. – 280 с.
5. Одегов, А.И. Многофазный поток в пласте, скважине и трубопроводе: курс лекций / А.И. Одегов. – М.: Юкос, 2003. – 210 с.
6. Brill, J.P. Multiphase Flow in Wells / SPE Monograph №17 / J.P. Brill, H. Mukergee. – Boston, 2009.
7. Hasan, A.R. Fluid Flow and Heat Transfer in Wellbores / SPE Richardson / A.R. Hasan, C.S. Kabir. – Texas, 2012.
8. Бубенчиков, А.М. Математические модели течения и теплообмена во внутренних задачах динамики вязкого газа: учебное пособие / А.М. Бубенчиков, Л.В. Комаровский, С.Н. Харламов. – Томск: Изд-во ТГУ, 2013. – 183 с.
9. Бубенчиков, А.М. Математические модели неоднородной анизотропной турбулентности во внутренних течениях: учебник / А.М. Бубенчиков, С.Н. Харламов. – Томск: Изд-во ТГУ, 2011. – 440 с.

УДК 537.523.9

ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА С ЖИДКИМ ЭЛЕКТРОЛИТНЫМ КАТОДОМ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПОТОКА ПАРОВОДЯНОЙ ПЛАЗМЫ

Г.Х. Тазмеев¹, Х.К. Тазмеев¹, Б.А. Тимеркаев²

¹Казанский федеральный университет, Набережночелнинский институт
GKTazmeev@kpfu.ru

²Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.
Туполева

Аннотация. Экспериментально исследован газовый разряд с проточным жидким электролитным катодом в условиях горения внутри протяженной камеры со стенками из огнеупорного материала. Медный анод располагался над катодом на расстоянии 20 см. Длина выходного канала составила 50 см. В качестве электролита использованы сильно разбавленные водные растворы хлорида натрия. Массовая скорость электролита варьировалась в пределах 8-16 г/с. Источником питания служил трехфазный двухполупериодный выпрямитель с напряжением на выходе 2100 В. Разряд горел устойчиво без балластного резистора. Получен плазменный поток с массовой скоростью 1.0-1.7 г/с в диапазоне мощности 25-30 кВт. Суммарные тепловые потери через электроды не превышали 30 % от потребляемой мощности.

Ключевые слова: газовый разряд, электролитный катод, пароводяная плазма.

Введение

Жидкий электролит, используемый в качестве катода, подвергается интенсивному тепловому воздействию. Электролит испаряется, распыляется, частично поступает в разрядную область и участвует в образовании плазмы. Количество рабочего электролита убывает. Убыль электролита растет при повышении тока [1-3]. Массовая скорость убыли зависит от тепловыделения внутри электролита и условий отвода тепла от электролита [2]. На практике реализованы режимы горения разряда, при которых убыль электролита происходит с массовой скоростью до 1.5 г/с [3]. Плазменные потоки с такими массовыми расходами вполне приемлемы для энергоемких плазменных

технологий. 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. Целью данной работы явилось исследование возможностей применения газового разряда с жидким электролитным катодом для создания потока пароводяной плазмы в диапазонах мощности 25-30 кВт.

Эксперимент

На рис. 1 представлена схема газоразрядного устройства (генератора плазмы) с источником питания. Разряд зажигается между катодным узлом 1 и анодом 2 внутри камеры, состоящей из корпуса 3 и футеровки 4. Выходной канал разрядной камеры удлинен на 50 см и снабжен металлическим кожухом 5. Подробное описание катодного узла приводится в [3]. Стрелками указаны направления потоков электролита. Электролит циркулирует через катодный узел с фиксированной массовой скоростью m . Часть электролита распыляется с открытой поверхности и поступает в разрядную область. Межэлектродное расстояние l составляет 20 см. Анод представляет собой медный стержень с диаметром 25 мм. Он охлаждается водой. Корпус 3 разрядной камеры изготовлен из асбоцементных материалов, а футеровка 4 выполнена из огнеупорных кирпичей.

Электрическое питание подавалось от трехфазного двухполупериодного выпрямителя, подключенного к вторичным обмоткам повышающего трансформатора. Пульсации напряжения сглаживались С-Л-С фильтром. Ток менялся ступенчатым варьированием балластного резистора R .

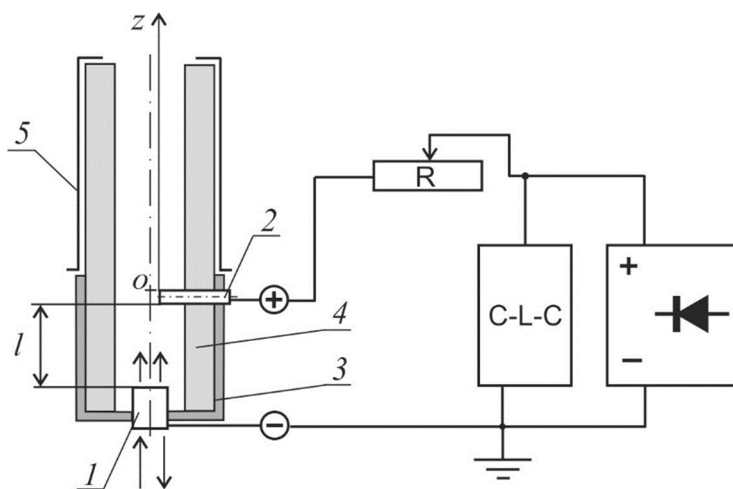


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Жидким электролитным катодом служили водные растворы хлорида натрия с удельной электрической проводимостью σ в пределах 10-15 мСм/см. При использовании таких растворов электролитов обеспечивается стабильное горение разряда на больших межэлектродных расстояниях [4].

В процессе горения разряда электролит расходуется на образование плазменного потока. Массовую скорость G убыли электролита можно считать численно равной массовому расходу потока плазмы. Убыль электролита компенсировалась добавлением дистиллированной воды во время работы генератора плазмы.

Для исследования тепловых и электрических характеристик применялись методики, описание которых даны в работах [2-3]. Температура в плазменном потоке измерялась платинородиевой термопарой ПР-30/6 на разных расстояниях z от анода.

Термопара перемещалась с помощью координатного устройства в трёх взаимно-перпендикулярных направлениях.

Результаты экспериментов и их анализ

На рис. 2 приведены осциллограммы тока I и напряжения U на генераторе плазмы. Эти параметры подвержены пульсациям.

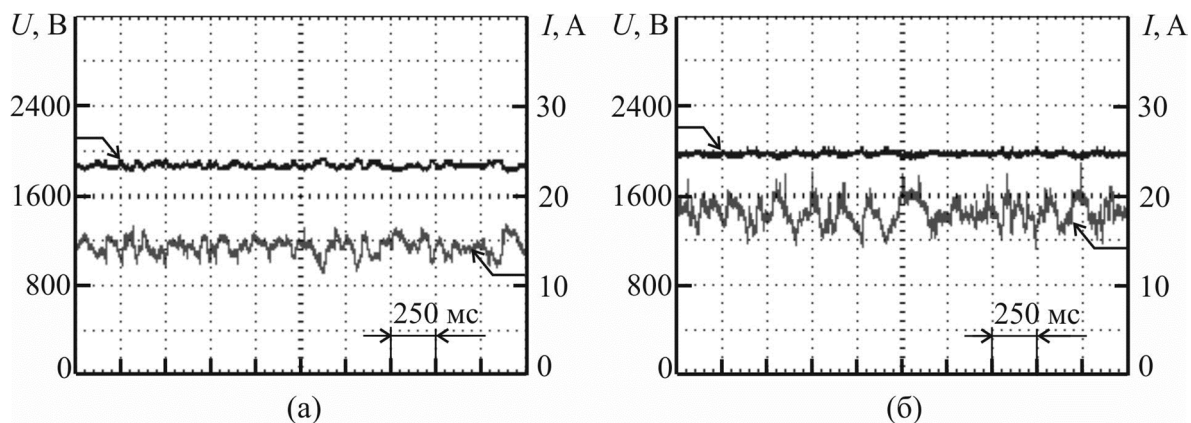


Рис. 2. Осциллограммы тока и напряжения. $\sigma = 11$ мСм/см. $m = 12$ г/с. (а) – $R = 14$ Ом; (б) – 0.

Как видно из сравнения осциллограмм, при повышении тока амплитуда его пульсаций увеличивается. По-видимому, усиление пульсаций вызваны уменьшением сопротивления балластного резистора. Аналогичные закономерности наблюдаются и в разряде, который горит в открытом воздухе [3]. Наличие пульсаций тока и напряжения является характерной особенностью газового разряда между жидким электролитным катодом и металлическим анодом.

Еще одна характерная особенность разряда проявляется при изменении интенсивности течения электролита через зону привязки разряда к катоду. В условиях горения разряда в открытом воздухе происходит повышение тока при увеличении расхода электролита [3]. Такая закономерность выявлена и в данной работе. Полученные результаты представлены на рис. 2а.

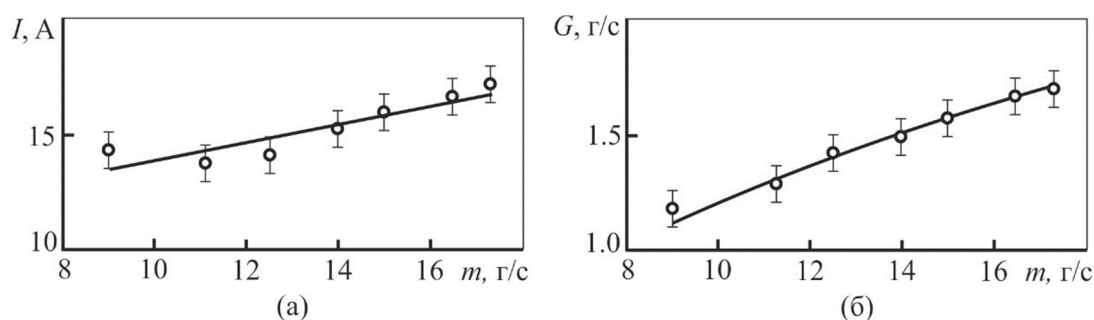


Рис. 2. Зависимости тока (а) и массового расхода плазмы (б) от массовой скорости потока электролита, протекающего через катодный узел. $\sigma = 11$ мСм/см. $R = 0$.

При увеличении массовой скорости потока электролита растет массовый расход потока плазмы (рис.2б). Закономерности изменения тока и массового расхода потока плазмы одинаковы. Такая корреляция между этими двумя параметрами свидетельствует о наличии значительного ионного тока. Ионы переносятся в плазму из катода в составе капелек раствора [5]. Чем больше капелек распыляется, тем больше ионов поступает в разрядную область и тем больше становится ток.

С практической точки зрения наибольший интерес представляют режимы работы генератора плазмы при нулевом сопротивлении балластного резистора ($R = 0$). В этом случае исключаются потери электрической энергии на нагрев балластного резистора. На рис. 3 представлены энергетические характеристики генератора плазмы, полученные в режимах работы без балластного резистора.

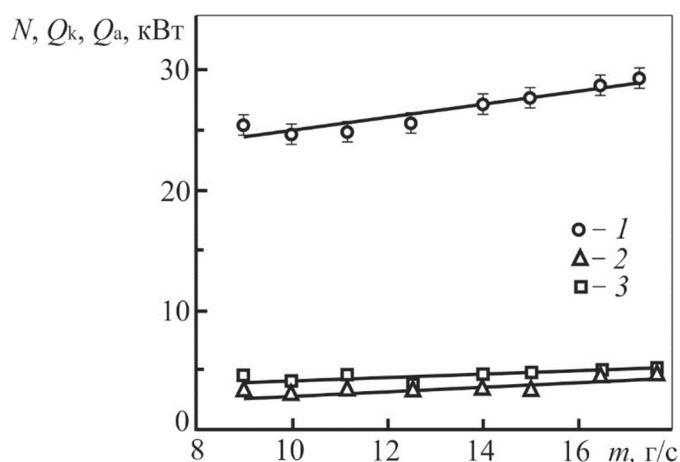


Рис. 3. Мощности генератора плазмы (N) и тепловых потерь через электроды (Q_k и Q_a) в зависимости от массовой скорости потока электролита m . $R = 0$. $\sigma = 11$ мСм/см. 1 – N ; 2 – Q_k ; 3 – Q_a .

Тепловые потери через электроды сравнительно малы. Мощности тепловых потерь через катод Q_k и анод Q_a отличаются незначительно. Повышение расхода электролита через катодный узел приводит к некоторому увеличению тепловых потерь Q_k и Q_a . При этом повышается мощность генератора плазмы N . Отношение суммы Q_k и Q_a к N меняется незначительно. Суммарные тепловые потери через электроды не превышают 30 % от потребляемой мощности.

В таблице 1 приведены результаты измерений температуры плазмы с помощью платинородиевой термодпары.

Таблица 1. Температура потока плазмы.

z , см	55	60	65	70	75	80
t , °С	1400±100	1350±100	1250±100	1150±100	950±100	800±100

На выходе из генератора плазмы создается поток плазмы с достаточно большой температурой несмотря на значительное удаление от разрядной области. Как показывает термодинамический анализ, при таких температурах может быть осуществлена плазменная конверсия отходов полиэтилена и полиэтилентерефталата в синтез-газ [1].

Выводы

Экспериментально показана возможность применения газового разряда с жидким электролитным катодом для получения потока пароводяной плазмы в диапазоне мощности 25-30 кВт. Основные параметры плазменного потока: массовый расход 1.1-1.7 г/с; температура 1400±100 °С на удалении 0.5 м от разрядной области.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках научного проекта № 18-42-160011.

Литература

1. Сироткин Н.А., Титов В.А. Экспериментальное исследование нагрева жидкого катода и переноса его компонентов в газовую фазу под действием разряда постоянного тока // Прикладная физика. – 2016. – № 6. – С. 25-31.
2. Тазмеева Р.Н., Тазмеев Б.Х. Экспериментальное исследование массового уноса жидкого электролитного катода под воздействием газового разряда // Прикладная физика. – 2014. – № 1. – С. 35-37.
3. Tazmееv Kh.K., Arslanov I.M., Tazmееv G.Kh. // Journal of Physics: Conference Series. – 2014. – V. 567, Issue 1. – Article number 012001.
4. Тазмеев Х.К., Арсланов И.М., Тазмеев Г.Х. Влияние локализации зоны привязки сильноточного разряда к жидкому электролиту на формирование плазменного столба // Прикладная физика. – 2013. – № 4. – С. 33-37.
5. Tazmееv G.K., Timerkaev B.A., Tazmееv K.K. About the mechanism of electric discharge between the electrolyte flow and the metallic anode // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1328, Issue 1. – Article number 012075.
6. Tazmееv A.Kh., Tazmееva R.N. Thermodynamic analysis of the plasma-chemical conversion of polymers into synthesis gas // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – V. 1058, Issue 1. – Article number 012036.

УДК 537.523.9

ГАЗОВЫЙ РАЗРЯД МЕЖДУ ДВУМЯ ЖИДКИМИ ЭЛЕКТРОЛИТНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

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

¹Казанский федеральный университет, Набережночелнинский институт
tazmееvh@mail.ru

²Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина

Аннотация. Экспериментально исследован газовый разряд между двумя жидкими электролитными электродами в диапазоне токов 0,5-3,5 А. В качестве жидких электролитов использованы водные растворы хлорида натрия, карбоната натрия, гидроксида калия и сульфата меди, а также водопроводная вода. Изучено влияние состава электролитов на характеристики разряда при разных полярностях подключения к источнику питания.

Ключевые слова: газовый разряд, электролитный катод, жидкий анод.

Введение

В настоящее время наблюдается повышенный интерес к газовым разрядам в газожидкостных системах, в которых жидкость служит в качестве электродов. Они являются источниками плазмы с большими возможностями для практических приложений. Имеются успешные примеры применения в технологиях обеззараживания воды, синтезе различных функциональных материалов, плазменной активации жидких реагентов, охране окружающей среды, а также плазменной медицине [1-4].

В большинстве случаев исследования проводятся в системах с одним жидким электродом, который служит в качестве катода или анода. Получить и поддерживать разряд между двумя жидкостями затруднительно. Некоторые сведения о разрядах между двумя жидкими электродами приводятся в работе [5]. Описывается общая пространственная структура разрядов постоянного и переменного токов. В качестве электродов использованы техническая вода и водный раствор сульфата меди. Получены вольтамперные характеристики в диапазоне токов 15-1000 мА при