

**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

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

атмосферном и пониженных давлениях. При атмосферном давлении разряд между жидкими электродами зажжен внутри кварцевой трубки.

В открытом воздухе разряды между двумя жидкостями получены в работе [6]. Авторами в качестве разрядного устройства использована система из двух желобков, по которым стекает вниз водопроводная вода. Желобки выполнены из диэлектрического материала и снабжены металлическими пластинами, к которым соединены полюса источника питания. Разряд зажигался между двумя потоками воды. Исследования проведены при межэлектродном зазоре 6 мм. Ток поддерживался в пределах 60-65 мА. Напряжение составляло ~ 1550 В.

Авторами работ [7-8] исследования проведены в более широком диапазоне изменения тока (0.5-3.5 А). Разработаны генераторы плазмы с конструктивными элементами, выполненными из пористого огнеупорного материала. Катодом служила жидкость, которая просачивалась через пористую преграду. Показано, что применение пористых элементов способствует повышению пространственной устойчивости плазменного столба и позволяет намного увеличить межэлектродное расстояние (до 25 мм при расположении анода внизу и катода сверху). В данной работе продолжены исследования с использованием этих генераторов плазмы, а также проведены исследования с генераторами плазмы в других вариантах.

Варианты генераторов плазмы

На рис. 1 приведены схемы генераторов плазмы, в которых катодный узел содержит пористую вставку.

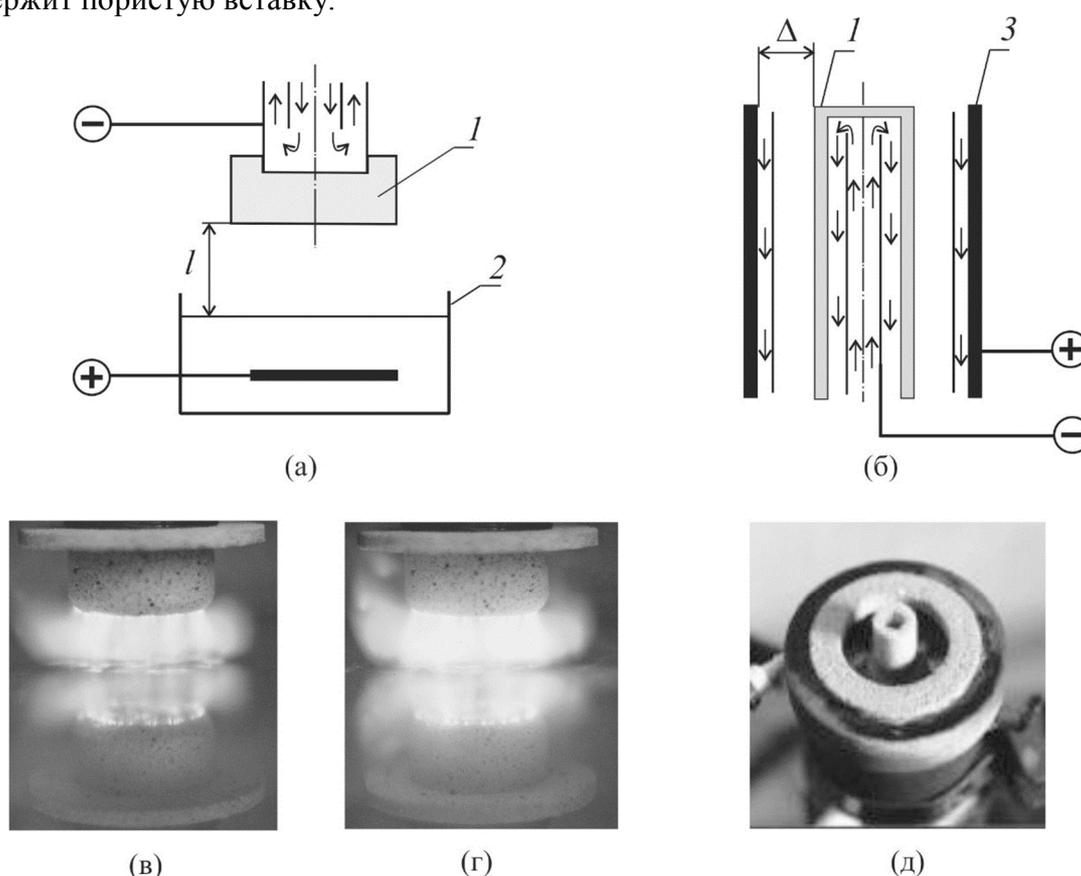


Рис. 1. Линейный (а) и коаксиальный (б) генераторы плазмы. 1 – пористая вставка катода; 2 – электролитическая ванна; 3 – цилиндрический токоподвод анода. На фото представлены газовые разряды, создаваемые в различных режимах: (в) – $I = 1,25$ А, $l = 15$ мм; (г) – $I = 1,5$ А, $l = 15$ мм; (д) – $I = 1,0$ А. Электролит – водопроводная вода.

В линейном генераторе плазмы (рис. 1а) анодом служит электролитическая ванна 2 емкостью 15 л. Катодный узел располагается над ванной. Через него циркулирует электролит. Часть электролита просачивается через пористую вставку 1. Разряд горит между влажной поверхностью пористой вставки и другим электролитом, которым наполнена ванна 2. Пористая вставка выполнена из огнеупорного диэлектрика. Зона привязки разряда занимает всю торцевую поверхность пористой вставки (рис. 1в и 1г). Причем эта зона является неоднородной, а состоит из множества отдельных ярких точечных участков. Они хорошо видны на зеркальном изображении на электролитном аноде. На фотографиях видно, что зона привязки разряда к аноду также является неоднородной и распределенной.

В коаксиальном генераторе плазмы электролит подается вовнутрь цилиндрического токоподвода анода 3 тангенциально. Он стекает вниз, образуя тонкую пленку на поверхности токоподвода. Электролит, служащий в качестве катода, просачивается через пористую вставку 1. Разряд горит в радиальном зазоре. Ширина зазора $\Delta = 5$ мм.

На рис. 2 представлен еще один вариант генератора плазмы. Конструкции анодного и катодного узлов одинаковы. Выходной канал 3 корпуса этих узлов выполнен в виде протяженной узкой щели. Ее длина составляет 20 см, а ширина – 3 мм. Материал корпуса – стеклотекстолит. Внутри корпусов смонтированы металлические токоподводы.

Электролит вытекает из щели 3 и стекает вниз, образуя тонкую пленку на поверхности корпуса. Прианодная 4 зона удалена от щели и примыкает к этой пленке, а прикатодная зона 5 начинается с выходной кромки щели (рис. 2б).

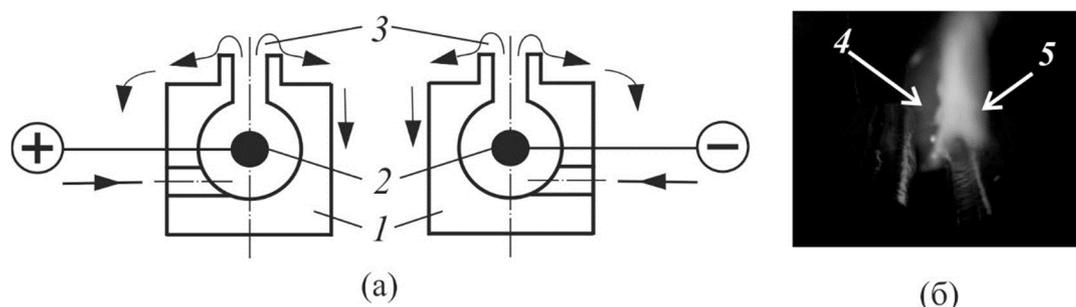


Рис. 2. Генератор плазмы с двумя проточными электролитными электродами. 1 – корпус электродного узла; 2 – металлический токоподвод; 3 – выходной канал, 4 и 5 – прианодная и прикатодная зоны газового разряда. Ток разряда 3 А. Стрелками показаны направления течения электролитов. Электролит – водный раствор хлорида натрия с концентрацией 0,5 % по массе.

Эксперимент

На генераторы плазмы электрическое питание подавалось от трехфазного двухполупериодного выпрямителя.

В качестве жидких электролитов использовались водные растворы хлорида натрия, карбоната натрия, гидроксида калия и сульфата меди, а также водопроводная вода.

На рис. 3 приведены вольтамперные характеристики коаксиального генератора плазмы, полученные при разных сочетаниях электролитов в качестве анода и катода.

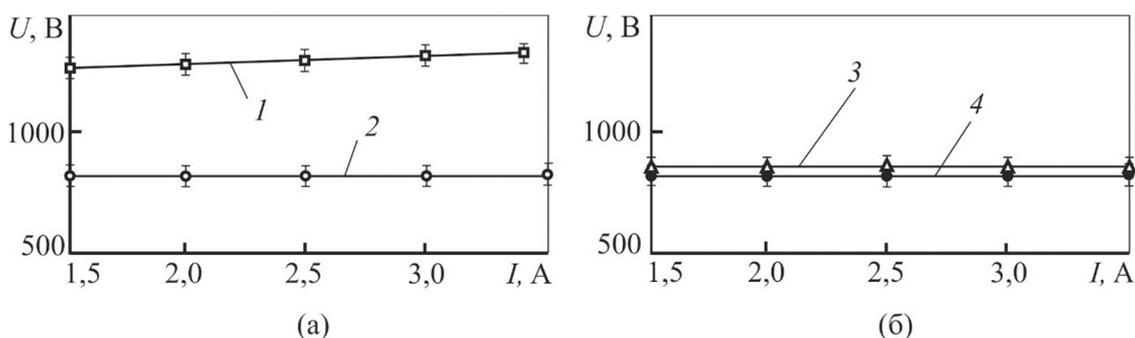


Рис. 3. Вольтамперные характеристики коаксиального генератора плазмы. Жидкие электроды: (а) – одинаковые аноды и разные катоды; (б) – одинаковые катоды и разные аноды. Анод: 1, 2, 3 – водопроводная вода; 4 – Na_2CO_3 1,0%. Катод: 1 – водопроводная вода; 2 – NaCl 0,5%; 3, 4 – Na_2CO_3 1,0%.

При одинаковых анодах напряжение U в значительной степени зависит от свойств электролита, используемого в качестве катода (рис. 3а). В случае одинаковых катодов напряжение U практически не зависит свойств электролита, используемого в качестве анода (рис. 3б). Эти же закономерности наблюдаются и в работе других генераторов плазмы.

Жидкий электролит подвергается тепловому воздействию и бомбардировке высокоэнергичными частицами. Происходит испарение и распыление электролита. Вещество электролита частично переносится в разрядную область. Закономерности, проявленные в вольтамперных характеристиках, свидетельствует о том, что со стороны катода вещество переносится существенно больше, чем со стороны анода.

Катод бомбардируется тяжелыми частицами – ионами. На анод в основном идет поток легких частиц – электронов. Поэтому катод распыляется более интенсивно, чем анод. Распыленное вещество участвует в образовании плазмы и влияет на ее свойства. Фото на рис. 2б наглядно иллюстрирует наличие этих процессов. Как видно, приэлектродные зоны окрашены в разные цвета, несмотря на то, что в качестве электродов используются одинаковые электролиты. Прикатодная зона окрашена желтым цветом, а прианодная – синим. Желтый цвет образуется за счет излучения атомов натрия, которые переносятся из электролита в плазму. Такая картина свидетельствует об интенсивном поступлении натрия из электролита, используемого в качестве катода.

Основные результаты экспериментов

Сравнивая варианты генераторов плазмы с двумя электролитными электродами можно отметить следующее. Коаксиальный вариант и вариант с щелевыми каналами позволяют использовать электролиты в значительно широком диапазоне концентраций. При этом в разрядную область вещество переносится преимущественно из катода. Свойства плазмы практически полностью зависят от электролита, используемого в качестве катода.

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

Литература

1. Locke B.R., Thagard S.M. Analysis and review of chemical reactions and transport processes in pulsed electrical discharge plasma formed directly in liquid water // *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. – 2012. – V. 32, № 5. – P. 875-917.
2. Bruggeman P J et al. Plasma-liquid interactions: A review and roadmap // *Plasma Sources Science and Technology*. – 2016. – V. 25. – P. 053002.

3. Kashapov L.N, Kashapov N.F., Kashapov R.N., Denisov D.G. // J. Phys.: Conf. Ser. – 2016. – V. 669. – P. 012029.
4. Ганиева Г.Р., Тимеркаев Б.А. // ИФЖ. – 2014. – Т. 87, № 3. – С. 677-681.
5. Гайсин Ф.М., Сон Э.Е., Шакиров Ю.И. Объёмный разряд в парогазовой среде между твёрдым и жидкими электродами. – М.: Изд-во ВЗПИ, 1990. – 92 с.
6. Баринов Ю.А., Школьник С.М. Зондовые измерения в разряде с жидкими неметаллическими электродами в воздухе при атмосферном давлении // ЖТФ. – 2002. – Т. 72, № 3. – С. 31–37.
7. Тазмеев Б.Х. Электрический разряд с электролитным катодом и его электрические характеристики // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. Казань. – 1999. – №4. – С. 71-76.
8. Тазмеев Х. К., Тазмеев Б. Х. Пористые элементы в генераторах плазмы с жидким электролитным катодом // ИФЖ. – 2003. – Т. 76, № 4. – С. 107–114.

УДК 537.523.9

ВЛИЯНИЕ ВДУВА ГАЗА НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИЛЬНОТОЧНОГО ГАЗОВОГО РАЗРЯДА С ЖИДКИМ ЭЛЕКТРОЛИТНЫМ КАТОДОМ

Х.К. Тазмеев¹, А.Х. Тазмеев¹, И.Г. Даутов²

¹Казанский федеральный университет, Набережночелнинский институт

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

Туполева

НКТazmeev@kpfu.ru

Аннотация. Экспериментально исследован газовый разряд с проточным жидким электролитным катодом в сильноточных режимах горения в условиях вдува газа в разрядную камеру. Межэлектродное расстояние составило 20 см. В качестве электролита использованы водные растворы хлорида натрия с удельной электрической проводимостью 10-12 мСм/см. Разрядный ток менялся в пределах 14-20 А. Исследования проведены со вдувом воздуха с массовым расходом до 2.2 г/с. Показано, что вдув воздуха приводит повышению разрядного тока и снижению тепловых потерь через электроды.

Ключевые слова: газовый разряд, жидкий катод, газоразрядная плазма.

Введение

Плазма, образуемая в газовых разрядах с жидким электролитным катодом, перспективна для использования в плазмохимических реакторах, предназначенных для энергоёмких плазменных технологий. К примеру, в работах [1-4] показана возможность использования такой плазмы для переработки отходов полимерных материалов. Разряд горел в небольшом вертикальном зазоре между жидким электролитом и металлическим электродом. Его высота была в пределах 3-4 мм. Такие небольшие размеры не позволяли ввод реагентов в разрядную область, где концентрация химически активных частиц наиболее высока. Реагенты подавались в плазменный поток на значительном удалении от разрядной области. Тем не менее был получен синтез-газ с достаточно хорошим химическим составом. Процесс протекал медленно и с большими затратами энергии. Снижение энергоёмкости и ускорение процесса возможно при вводе реагентов непосредственно в разрядную область. Однако в этих условиях газовый разряд мало изучен. Имеются работы, в которых исследования проведены при небольших токах [5-6]. При многократном увеличении тока физическая картина явлений может