

**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**

XII Международная научно-техническая конференция

Казань, 10–12 ноября 2020 г.

Сборник статей



**КАЗАНЬ
2021**

УДК 533.9
ББК 22.333
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;
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:** XII Международная научно-техническая конференция (Казань, 10–12 ноября 2020 г.): сборник статей. – Казань: Издательство Казанского университета, 2021. – 154 с.

ISSN 2312-2285
ISBN 978-5-00130-526-2

Сборник содержит материалы XII 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 имени А.Н. Туполева – КАИ, Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук».

УДК 533.9
ББК 22.333

ISSN 2312-2285
ISBN 978-5-00130-526-2

© Издательство Казанского университета, 2021

Gabdrakhmanov, A.T. 2017. Journal of Physics: Conference Series, 789(1), 012008.

Power efficient device for pumping and compression pipes cleaning from asphalt, resin and paraffin deposits. Galiakbarov, R.T., Samigullin, A.D., Gabdrakhmanov, A.T., Saetgaraev, D.D. 2019 Journal of Physics: Conference Series, 1328(1), 012020.

УДК 537.523.9

**ИССЛЕДОВАНИЕ КАТОДНОГО ПЯТНА НА ЖИДКОМ
ЭЛЕКТРОЛИТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ
И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОБРАБОТКИ
ЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Б.Х. Тазмеев¹, В.В. Цыбулевский¹, Р.Н. Тазмеева², Г.Х. Тазмеев²

*¹Кубанский государственный аграрный университет
имени И.Т. Трубилина*

tazmeevb@mail.ru

*²Казанский федеральный университет,
Набережночелнинский институт*

Ключевые слова: газовый разряд, электролитный катод, катодное пятно, высокоскоростная визуализация, цифровая обработка цветного изображения.

Аннотация. Произведена обработка цветных изображений области концентрации катодных пятен, полученных в результате высокоскоростной визуализации газового разряда с жидким электролитным катодом. Построены функции полигона эмпирического распределения для кода интенсивности цвета. Выявлена корреляция между интенсивностью излучения и мелкомасштабными пульсациями тока.

Введение

В настоящее время наблюдается нарастающее внимание к источникам неравновесной плазмы с жидкими электродами [1, 2]. Как показывают исследования, такие плазменные источники обладают широкими возможностями практического применения, например, использование их в оптической эмиссионной спектроскопии позволяет проводить оперативно быстрый анализ жидких проб в полевых условиях [3].

Однако следует отметить, что механизмы взаимодействия плазмы с жидкими электродами все еще недостаточно полно изучены. Особенно это относится к процессам прохождения электрического тока через границу «плазма-жидкость».

При малых токах (в пределах несколько десятков миллиампер) анодное пятно может проявиться в виде устойчивого рисунка с определенным узором [4, 5] в диапазоне токов 20-80 мА и плотности тока 1 А/см². Самоорганизация катодного пятна наблюдается при пониженных давлениях [6]. В отличие от случая анода рисунок катодного пятна является расплывчатым и подвижным. При атмосферном давлении катодное пятно принимает круглые очертания. В геометрии электродов «игла-пластина» принято его рассматривать как круг с определенным диаметром [4, 6]. В диапазоне токов 10-100 мА типичные значения плотности тока на жидком катоде находятся в пределах 0.5–2.5 А/см².

При повышенных токах однородность свечения катодного пятна нарушается, пространственная структура разряда около катода при токах порядка 1 А и более становится многоканальной [6 - 10]. Следовательно, для описания явлений переноса зарядов и вещества на границе «плазма-жидкость» должны учитываться локальные плотности тока. Для этого потребуются надежные экспериментальные данные. В связи с этим целью данной работы явилась разработка методики исследования катодного пятна на жидком электролите с использованием высокоскоростной визуализации и программы MathCad.

Эксперимент

Исследование катодного пятна на жидком электролите проводилось при помощи высокоскоростной визуализации. Скоростная видеосъемка производилась камерой Photron FASTCAM SA4 в режимах 10000-20000 кадров в секунду. Ее технические характеристики позволяют детально изучить процессы на границе «плазма-жидкость».

На рис. 1 представлены фрагмент схемы экспериментальной установки и фотоснимок электроразрядного устройства, в котором формировался поток электролита на узкой щели. В качестве электролита использовался водный раствор хлорида натрия с концентрацией по массе 5 г/с.

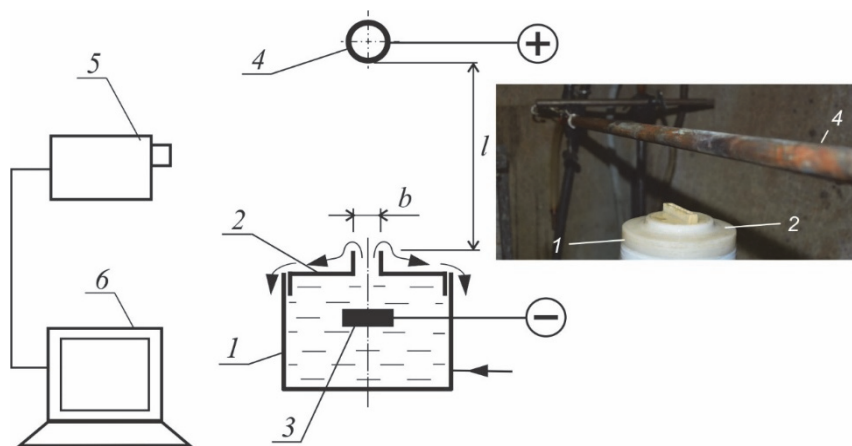


Рис. 1. Экспериментальная установка

Жидкий электролит подавался во внутрь катодного узла 1. Выход из него был закрыт крышкой 2, которая имела щелевой зазор шириной $b = 2.5$ мм. Длина щели равнялась 35 мм. На краях зазора были выполнены буртики высотой 5 мм. Внутри катодного узла была смонтирована графитовая пластина 3, которая подсоединялась к отрицательному полюсу источника питания. Разряд горел между электролитом и водоохлаждаемым металлическим анодом 4. Анод был выполнен в виде длинной трубки. Он был ориентирован вдоль щели и располагался над ней на расстоянии $l = 4$ см. Накопленная в видеокамере 5 информация передавалась компьютеру 6.

Обработка и анализ результатов

Обработка цветного изображения в системе MathCad производилась с использованием RGB-метода. При нем изображение представляется суммой трех составляющих с красным (Red), зеленым (Green) и синим (Blue) цветами. При помощи функций MathCad было произведено считывание цветных изображений из файлов и формирование строенного массива M , содержащего три монохромных изображения, представляющие яркости трех указанных цветов. В качестве примера на рис. 2 представлена строенная матрица для одного из видеокадров, полученных в режиме съемки 20000 кадров в секунду.

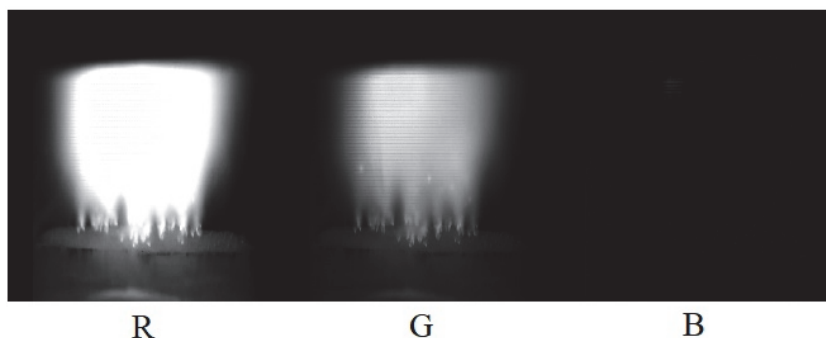


Рис. 2. Строенная матрица (M) красного, зеленого и синего компонентов

С помощью функции «submatrix» можно выделить из матрицы M три массива R , G и B , несущие информацию отдельно по каждому из трех цветов. Как видно из рис. 2, в красном цвете изображение газового разряда является слишком ярким. Пространственная структура слабо проглядывается. В синем цвете яркость настолько мала, что изображение практически отсутствует. Наиболее приемлемой для обработки является массив G . Обработка этого массива G была произведена по заданному алгоритму [11, 12]. Для обработки была выделена область концентрации катодных пятен. В этой области условный признак катодного пятна повторялся с разной частотой в выделенном массиве. Частота достигала максимума при определенном значении кода интенсивности цвета. Результаты обработки могут быть представлены следующей аппроксимирующей функцией

$$f = \frac{1000}{1.4795 \times g^2 + 5013.4 \times \ln g - 376.71 \times g}.$$

Здесь f – частота повторения условного признака катодного пятна; g – код интенсивности канала зеленого цвета.

На рис. 3 дано графическое изображение полученных результатов для режима горения 1 А. Как видно, имеется явный максимум в интервале от 108 до 118 единиц кода интенсивности. Результаты получились аналогичными и в других токовых режимах.

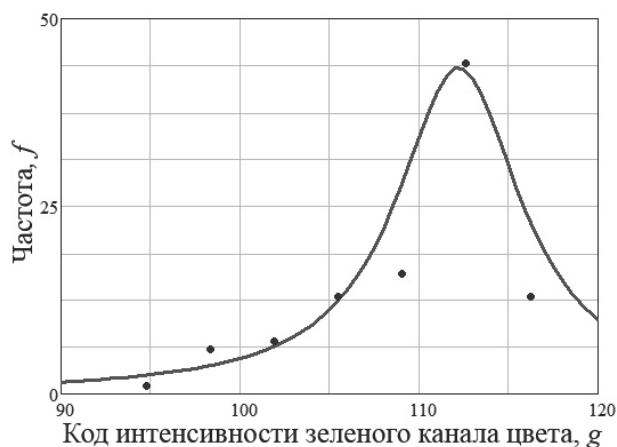


Рис. 3. Зависимость частоты попадания признака катодного пятна в заданный интервал кода интенсивности цвета. Точки – результаты обработки эксперимента. Сплошная линия – расчет

Характерным признаком газового разряда с жидким электролитным катодом является наличие мелкомасштабных пульсаций тока [13]. Максимуму интенсивности излучения соответствует максимум амплитуды тока. Таким образом, обнаруживается корреляция между интенсивностью излучения и мелкомасштабными пульсациями тока.

Основные результаты

В результате исследования разряда с жидким катодом, используя высокоскоростную визуализацию и программное обеспечение обработки цветных изображений в системе MathCad, определен диапазон для кода интенсивности канала цвета катодного пятна. Высокоскоростная визуализация производилась с частотой в десятки тысяч кадров в секунду, что позволило выявить корреляционную зависимость между частотой изменения интенсивности излучения в области катодных пятен и мелкомасштабными пульсациями тока разряда. Построены функции полигона эмпирического распределения кода интенсивности цвета, которые могут быть использованы при моделировании процессов на границе жидкий катод – плазма.

Литература

1. Bruggeman P. J. et al. Plasma–liquid interactions: a review and roadmap // Plasma Sources Science and Technology. – 2016. – Т. 25, № 5. – С. 053002.

2. Adamovich I. et al. The 2017 Plasma Roadmap: Low temperature plasma science and technology // Journal of Physics D-Applied Physics. – 2017. – Т. 50, № 32.

3. Hall K. A., Marcus R. K. Parametric optimization and spectral line selection for liquid sampling-atmospheric pressure glow discharge - optical emission spectroscopy // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. – 2019. – Т. 34, № 12. – С. 2428-2439.

4. Shutov D. A., Artyukhov A. I., Ivanov A. N., Rybkin V. V. Comparison of the Characteristics of DC Discharges with a Liquid Anode and a Liquid Cathode over Aqueous Solutions of Zinc Nitrate // Plasma Physics Reports. – 2019. – Т. 45, № 11. – С. 997-1004.

5. Shirai N., Ibuka S., Ishii S. Self-Organization Pattern in the Anode Spot of an Atmospheric Glow Microdischarge using an Electrolyte Anode and Axial Miniature Helium Flow // Applied Physics Express. – 2009. – Т. 2, № 3.

6. Gaisin A. F., Nasibullin R. T. Peculiarities of an Electric Discharge between an Electrolytic Cathode and a Metal Anode // Plasma Physics Reports. – 2011. – Т. 37, № 10. – С. 896-903.

7. Tazmeev K. K., Tazmeev B. K. Porous elements in plasma generators with a liquid electrolytic cathode // Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal. – 2003. – V. 76, № 4. – P. 107-114.

8. Tazmeeva R. N., Tazmeev B. K. Development features of the plasma flow in the gas discharge with the liquid electrolyte cathode // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1328. – P. 012074.

9. Tazmeev G. K., Tazmeeva R. N., Tazmeev B. K. Gas discharge between two liquid electrolyte electrodes // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – V. 1588. – С. 012050.

10. Tazmeev K. K., Arslanov I. M., Tazmeev B. K. and Tazmeev G. K. Formation of powerful plasma flow from substance of liquid electrolyte cathode // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1393. – С. 012061.

11. Маслов Г.Г., Борисова С.М., Цыбулевский В.В., Палапин А.В. Способ определения степени покрытия поверхности рабочей жидкостью // Патент на изобретение RU 2290693 С2, 27.12.2006. Заявка № 2004124339/09 от 09.08.2004.

12. Цыбулевский В.В., Таратута В.Д., Серга Г.В. Способ определения количества объектов на плоской поверхности // Патент на изобретение RU 2420801 С2, 10.06.2011. Заявка № 2009111956/08 от 31.03.2009.

13. Tazmееv G. Kh., Timerkaev B. A., Tazmееv Kh. K. The high-frequency current pulsations in the gas discharge with liquid electrode // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – V. 669. – С. 012057.

УДК 51-72;533;537

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИ ЗАРЯЖЕННОЙ ГАЗОВЗВЕСИ

Тукмаков Д.А.¹

ИММ ФИЦ КазНЦ РАН

tukmakovDA@imm.knc.ru

Ключевые слова: численное моделирование, многофазные среды, межфазное взаимодействие, вязкий газ, электрогидродинамика.

Аннотация. В данной работе рассматривается распространение акустического импульса из чистого газа в гетерогенную смесь, состоящую из твердых частиц, взвешенных в газе и имеющих электрический заряд. Математическая модель учитывает скоростное и тепловое взаимодействие несущей и дисперсной компонент смеси. Несущая среда описывалась как вязкий сжимаемый теплопроводный газ. Уравнения математической модели решались численным конечно-разностным методом. В работе рассматривается течение двухфазной среды в канале, часть которого заполнена чистым газом, а часть запылённой средой. При одинаковом заряде частиц электрически заряженной газовзвеси, под действием силы Кулона частицы начинают движение из участка трубы, заполненного электрически заряженной запылённой средой в ту часть трубы, которая заполнена чистым газом. В работе рассматривалось взаимодействие акустического возмущения, генерируемого движущейся запылённой средой с акустическим возмущением движущемся из чистого газа. Выявлено, что при воздействии встречного акустического импульса происходит увеличение давления в акустическом возмущении, движущегося из электрически заряженной газовзвеси.