

УДК 533.9.082.5
EDN: RNGKPM

PACS: 47.80.Jk, 52.70.Kz, 52.80.-s

Исследование газовых потоков, создаваемых разрядом с жидким электролитным катодом© А. В. Чистолинов^{1,*}, П. Н. Казанский¹, Р. В. Якушин², В. М. Чепелев¹, А. С. Тюфтяев¹¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, 125412 Россия

* E-mail: a-chi@yandex.ru

² Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, Москва, 125047 Россия

Статья поступила в редакцию 14.03.2025; после доработки 4.04.2025; принята к публикации 20.10.2025

Методами цифровой трассерной визуализации (PIV) и скоростной фотосъемки исследован разряд с жидким электролитным катодом при атмосферном давлении в воздухе. Определено поле скоростей газовых потоков, создаваемых разрядом. Показано, что газовый поток, создаваемый разрядом, движется вниз вдоль разрядного канала к поверхности раствора, достигая максимальной скорости вблизи его поверхности. Встречаясь с поверхностью раствора газ начинает растекаться вдоль неё в тонком слое толщиной около двух миллиметров. Таким образом, установлено, что компоненты раствора, перенесённые из раствора в газовую фазу под действием разряда с жидким катодом, выносятся из зоны разряда в горизонтальном направлении, вдоль поверхности раствора.

Ключевые слова: цифровая трассерная визуализация (PIV); газовые потоки; электрический разряд; жидкий катод; атмосферное давление; воздух; перенос компонентов раствора в газовую фазу.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-5-71-77

Введение

Взаимодействия электроразрядной плазмы с поверхностью жидкости и, в частности, с поверхностью водных растворов является объектом повышенного интереса исследователей в последние годы [1]. Если жидкость является электропроводящей, то наиболее простым и эффективным способом организации взаимодействия электроразрядной плазмы с её поверхностью является создание электрического разряда, в котором эта жидкость будет выполнять роль одного из электродов. Такой разряд с жидким электродом при характерных токах от нескольких миллиампер до нескольких сотен миллиампер является тлеющим разрядом при атмосферном давлении [2].

Если раствор в этом разряде является катодом, то бомбардировка поверхности раствора положительными ионами приводит к ин-

тенсивным плазмохимическим реакциям в жидкости [2, 3]. Поэтому исследование разряда с жидким катодом представляет большой интерес с точки зрения плазмохимических приложений. Разряды с жидким катодом имеют перспективы практического применения в новых методах очистки воды, модифицирования высокомолекулярных соединений, стерилизации водных растворов, анализа растворов на содержание металлов, биомедицинских приложениях и многих других [3–15]. Перспективы практического применения делают актуальными исследования разрядов с жидким катодом [16–28].

Величина катодного падения напряжения в разряде с жидким катодом достаточно велика и составляет, в зависимости от состава жидкого катода, от 400 до 700 В [2, 3]. Поэтому ионная бомбардировка поверхности жидкого катода приводит к интенсивному переносу

су компонентов раствора в газовую фазу. Перенос компонентов раствора в газовую фазу под действием разряда с жидким катодом принято характеризовать коэффициентом переноса, который равен количеству перенесённых в газовую фазу молекул вещества в расчёте на один бомбардирующий поверхность раствора ион [2]. При этом, в газовую фазу переносятся не только летучие, но и нелетучие компоненты раствора, такие как ионы металлов, что, в частности, позволяет определять их в плазме разряда с жидким катодом по эмиссионным спектрам [8–10, 21, 24].

Но, наиболее интенсивно переносится в газовую фазу в разряде с жидким катодом из разбавленных растворов вода. Существуют разные данные по переносу воды в газовую фазу в разряде с жидким катодом, так как этот процесс, по-видимому, зависит от многих факторов, таких как: температура раствора, режим его перемешивания и т. д. [25]. Однако, в самом простом случае, когда разряд с жидким катодом происходит в непроточной разрядной ячейке с естественным перемешиванием раствора и естественным его охлаждением за счёт взаимодействия с атмосферой, коэффициент переноса воды в газовую фазу при разрядном токе 50 мА составляют около 500 молекул/ион [29]. Плотность тока в катодном пятне на поверхности раствора по данным [30] составляет $0,5 \text{ А/см}^2$, а плотность водяного пара при атмосферном давлении и температуре $100 \text{ }^\circ\text{C}$ составляет $0,6 \text{ кг/м}^3$. При этих условиях для средней скорости истечения потоков водяного пара из катодного пятна получаем оценку $0,8 \text{ м/с}$. При более высокой температуре пара средняя скорость истечения из катодного пятна будет очевидно ещё выше.

После истечения из катодного пятна пар начинает взаимодействовать с атмосферным воздухом. Очевидно, что в результате взаимодействия с атмосферным воздухом температура водяного пара в конечном счёте упадёт ниже $100 \text{ }^\circ\text{C}$ и тогда его парциальное давление станет ниже атмосферного. То есть, покинуть зону разряда водяной пар сможет только вместе с потоком воздуха. Поэтому движение атмосферного воздуха вблизи разряда с жидким катодом должно оказывать чрезвычайно сильное влияние на измеряемый коэффициент переноса воды из водного раствора.

В настоящей работе мы исследуем движение воздуха вблизи разрядного канала разряда с жидким катодом методом цифровой трассерной визуализации (PIV).

Метод цифровой трассерной визуализации относится к классу бесконтактных методов измерения скорости в потоках. В ряду других инструментов для исследования структуры течений он занимает особое место благодаря возможности регистрировать мгновенные пространственные распределения скорости. Измерение мгновенного поля скорости потока в заданном сечении основано на измерении перемещения частиц примеси, находящихся в плоскости сечения, за фиксированный интервал времени.

В поток жидкости или газа добавляются частицы малого размера (трассеры). Лазерный луч формируется в световой лист, освещающий засеянные частицы дважды с коротким временным интервалом. Измерительной областью потока считается плоскость, «вырезаемая» световым листом. Рассеянный частицами свет записывается на два последовательных кадра цифровой камеры высокого разрешения. Последующая обработка изображений позволяет рассчитать смещения частиц за время между вспышками источника света и построить двухкомпонентное поле скорости. Измеренные двухкомпонентные значения векторов являются проекциями реальных (трехмерных) векторов на плоскость, перпендикулярную оптической оси, регистрирующей образы частиц аппаратуры [31].

Экспериментальная установка и методика измерений

Для исследования поля скоростей газовых потоков вблизи разрядного канала и вблизи поверхности раствора использовался разряд с жидким катодом при атмосферном давлении в воздухе. Разряд создавался между стержневым вольфрамовым электродом диаметром 2 мм и поверхностью раствора. Расстояние между стержневым электродом и поверхностью раствора составляло 4 мм, разрядный ток 60 мА.

Раствор находился в непроточной стеклянной разрядной ячейке цилиндрической формы объёмом 100 мл. Глубина разрядной

ячейки составляла 14 мм. Уровень раствора совпадал с краем разрядной ячейки.

В качестве раствора использовался раствор нитрата натрия в дистиллированной воде с удельной электропроводностью 300 мкСм/см и уровнем pH = 4,7.

Для получения скоростного изображения разрядного канала с высоким пространственным разрешением использовался фотоаппарат Nikon D500. Время экспозиции одного кадра при фотосъёмке составляло 125 мкс.

Для определения скоростей газовых потоков вблизи разрядного канала и вблизи поверхности жидкого катода применялась система измерения скорости частиц LaVision FlouMaster Stereo PIV с разрешением до 50 мкм.

Световой лист толщиной 0,5 мм, сформированный лазерным лучом, создавался в вертикальной плоскости на расстоянии примерно 1 мм перед электродом, роль которого выполнял вольфрамовый стержень диаметром 2 мм. Таким образом, съёмка велась в вертикальном срезе, находящемся на расстоянии около 2 мм от оси разряда. Ближайшие 0,5 мм вблизи поверхности раствора не попадали в зону съёмки, чтобы избежать отражения лазерного излучения от поверхности раствора.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Для определения общего вида разряда с жидким катодом при разрядном промежутке 4 мм и разрядном токе 60 мА для раствора нитрата натрия с электропроводностью 300 мкСм/см и pH = 4,7 использовалась скоростная фотосъёмка (рис. 1).

Данные скоростной фотосъёмки показали, что разряд имеет форму близкую к конусообразной. Вершина конуса упирается в точку привязки разряда к поверхности вольфрамового электрода. Основанием конуса служит поверхность раствора. Вблизи поверхности раствора разрядный канал разделяется на отдельные филаменты, каждый из которых заканчивается отдельным катодным пятном. Изучение данных скоростной фотосъёмки показало, что количество филаментов и их положение меняется во времени. Изменяется также диаметр зоны, занятой катодными пят-

нами на поверхности раствора. Диаметр зоны, занятой катодными пятнами, при этом он не превышает 4 мм, что находится в хорошем согласии с данными для средней плотности катодного тока из [8, 9].



Рис. 1. Фотография разряда с жидким катодом. Разрядный промежуток 4 мм, разрядный ток 60 мА. Раствор нитрата натрия с электропроводностью 300 мкСм/см и pH = 4,7

Поскольку световой лист, сформированный лазерным лучом, находился достаточно близко к металлическому электроду (расстояние около 1 мм), поверхность электрода была слегка им подсвечена. Фотография рассеяния лазерного излучения на металлическом электроде и взвешенных в воздухе частицах позволяла привязать положение электрода и поверхности раствора к координатной сетке (рис. 2). Согласно этой привязке нижняя граница электрода находилась на уровне -4 мм, а поверхность раствора на уровне -8 мм.

Определение распределения скоростей газовых потоков в разряде с жидким катодом PIV методом показало, что в зоне разрядного канала скорость газа направлена вертикально вниз (рис. 3). Причём, скорость газового потока возрастает при движении от кончика металлического электрода к поверхности раствора. Вблизи кончика металлического электрода скорость газового потока составляет около 0,3 м/с, а вблизи поверхности раствора около 0,85 м/с. Белая вертикальная линия на рис. 3 – результат засветки в результате рассеяния лазерного излучения на поверхности электрода.

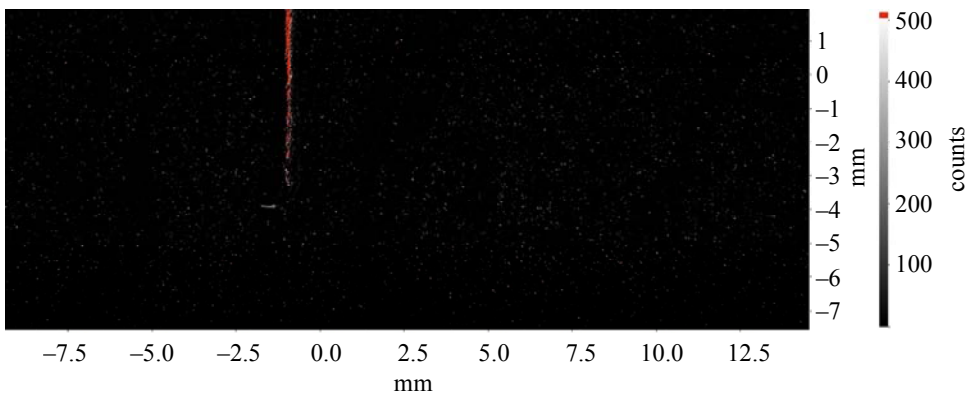


Рис. 2. Фотография рассеяния лазерного излучения на металлическом электроде и взвешенных в воздухе частицах с привязанной координатной сеткой

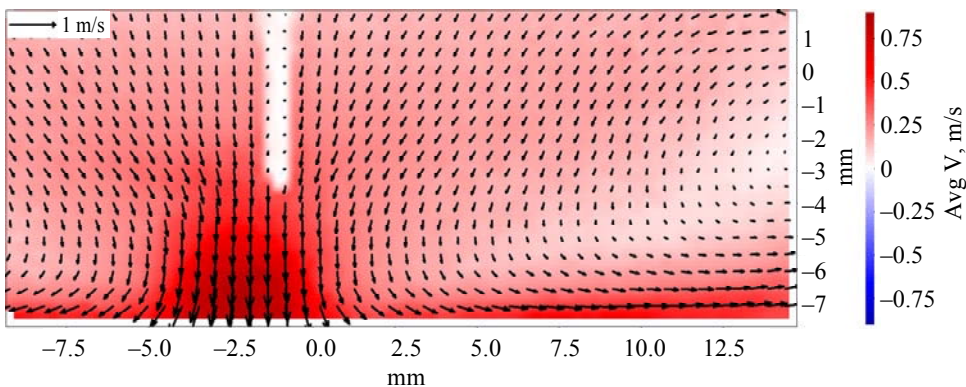


Рис. 3. Распределение скоростей газовых потоков вблизи разряда с жидким катодом. Цветом показан модуль скорости газового потока

Вблизи поверхности раствора газовый поток разворачивается и начинает растекаться от оси разряда во все стороны вдоль поверхности раствора. Максимальная горизонтальная составляющая скорости газового потока достигается вблизи поверхности раствора на расстоянии 0,5 мм от поверхности (более близкие к поверхности слои не попадали в зону съёмки). Максимальная горизонтальная составляющая скорости газового потока вблизи поверхности составляет 0,2 м/с (рис 4).

На расстоянии менее 10 мм от оси разряда вблизи поверхности раствора существует вертикальная составляющая газового потока, направленная вниз. На расстоянии примерно от 10 до 15 мм от оси разряда газовый поток движется вдоль поверхности раствора практически горизонтально. Горизонтальная составляющая скорости на этом участке достигает своего максимума. При расстоянии более 15 мм от оси разряда появляется вертикальная составляющая скорости потока, направленная от поверхности раствора.

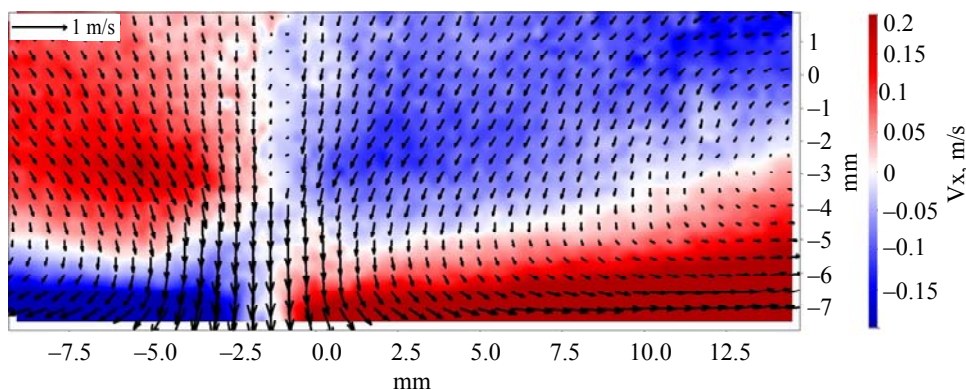


Рис. 4. Распределение скоростей газовых потоков вблизи разряда с жидким катодом. Цветом показана проекция скорости на горизонтальную ось

Можно предположить, что в разряде с жидким электролитным катодом движение положительных ионов (концентрация которых с учётом частичного прилипания электронов выше концентрации отрицательных ионов) приводит в движение нейтральную компоненту газа, что и приводит к засасыванию окружающего воздуха из области вблизи металлического электрода и его движению вниз к поверхности раствора. Для подтверждения данного механизма ускорения нейтральной компоненты газа планируется проведение дальнейших исследований, которые будут включать анализ всех факторов, способных вызвать движение нейтральных частиц, а также эксперименты со сменой полярности электродов.

В настоящей работе показано, что вблизи разряда с жидким электролитным катодом газ движется вдоль разрядного канала вниз к поверхности раствора и растекается вдоль поверхности раствора в тонком слое примерно 2 мм толщиной с максимальной горизонтальной составляющей скорости 0,2 м/с. Важность этого результата состоит в том, что в этом же тонком слое вместе с потоками газа будет выноситься из зоны разряда и вода в виде пара и микрокапель раствора, перенесённая в газовую фазу под действием разряда с жидким катодом. Однако, из-за тонкости этого слоя и его близости к поверхности раствора в этой области возможен диффузионный перенос компонентов раствора из газовой фазы обратно в раствор. При расстоянии более 15 мм от оси разряда появляется вертикальная составляющая скорости потока, направленная от поверхности раствора. В этой области начинается необратимый вынос перенесённых в газовую фазу компонентов раствора из разрядной ячейки.

Заключение

Методами скоростной фотосъёмки и PIV исследован разряд с жидким катодом при разрядном промежутке 4 мм и разрядном токе 60 мА при атмосферном давлении в воздухе. С помощью PIV метода измерено поле скоростей газовых потоков вблизи разрядного канала и вблизи поверхности раствора. Показано, что газовый поток, создаваемый электри-

ческим разрядом, движется вниз вдоль разрядного канала к поверхности раствора. Максимальная скорость вертикального движения газа достигается вблизи разрядного канала у поверхности раствора и составляет 0,85 м/с. Далее газ растекается вдоль поверхности раствора в тонком слое примерно 2 мм толщиной с максимальной горизонтальной составляющей скорости 0,2 м/с. Компоненты раствора, перенесённые из раствора в газовую фазу под действием разряда с жидким катодом, выносятся из зоны разряда этим газовым потоком. Учитывая небольшую толщину этого газового потока и большую площадь его контакта с поверхностью раствора, можно предположить, что какая-то часть компонентов раствора, перенесённая в газовую фазу, может при этом возвращаться обратно в раствор.

*Работа выполнена при поддержке
Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации (государственное задание
№ 075-00269-25-00).*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bruggeman P., Frontiera R., Kortshagen U., Kushner M., Linic S., Schatz G., Andaraarachchi H., Exarhos S., Jones L., Mueller C., Rich C., Xu C., Yue Y., Zhang Y. / J. Appl. Phys. 2021. Vol. 129. P. 200902.
2. Максимов А. И. Физико-химические свойства плазменно-растворных систем и возможности их технологических применений / Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Т. XI-5. Прикладная химия плазмы / Под ред. Лебедева Ю. А., Платэ Н. А., Фортгова В. Е. – М.: Янус-К, 2006.
3. Кутепов А. М., Захаров А. Г., Максимов А. И. Вакуумно-плазменное и плазменно-растворное модифицирование полимерных материалов. – М.: Наука, 2004.
4. Yang Y., Cho Y. I., Fridman A. Plasma Discharge in Liquid: Water Treatment and Applications. – CRC Press, 2012.
5. Ren J., Yao M., Yang W., Li Y., Gao J. / Centr. Eur. J. Chem. 2014. Vol. 12. № 12. P. 1213.
6. Rezaei F., Vanraes P., Nikiforov A., Morent R., De Geyter N. / Materials. 2019. Vol. 12. № 17. P. 2751.
7. Malik M. A. / Plasma Chem. Plasma Proc. 2010. Vol. 30. P. 21.
8. Mezei P., Cserfalvi T. / Appl. Spectr. Rev. 2007. Vol. 42. № 6. P. 573.
9. Webb M. R., Andrade F. J., Gamez G., McCrindle R., Hieftje G. M. / J. Anal. At. Spectrom. 2005. Vol. 20. № 11. P. 1218.

10. Bencs L., Laczai N., Mezei P., Cserfalvi T. / Spectrochim. Acta, Part B. 2015. Vol. 107. P. 139.
11. Choi H. S., Shikova T. G., Titov V. A., Rybkin V. V. / J. Coll. Interface Sci. 2006. Vol. 300. № 2. P. 640.
12. Joshi R., Schulze R.-D., Meyer-Plath A., Friedrich J. / Plasma Proc. Polym. 2008. Vol. 5. P. 695.
13. Saito G., Akiyama T. / J. Nanomat. 2015. Vol. 2015. P. 123696.
14. Mariotti D., Sankaran R. M. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. Vol. 43. № 32. P. 323001.
15. Суров О. В., Воронова М. И., Тумов В. А., Захаров А. Г. / Прикладная физика. 2021. № 1. С. 17.
16. Bruggeman P., Leys C. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. Vol. 42. № 5. P. 1.
17. Bruggeman P., Liu J., Degroote J., Kong M. G., Vierendeels J., Leys Ch. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. Vol. 41. P. 215201.
18. Vanraes P., Bogaerts A. / Applied Physics Reviews. 2018. Vol. 5. P. 031103.
19. Verreycken T., Schram D. C., Leys C., Bruggeman P. / Plasma Sources Sci. Technol. 2010. Vol. 19. P. 045004.
20. Гайсин А. Ф., Сон Э. Е. / ТБТ. 2005. Т. 43. № 1. С. 5.
21. Максимов А. И., Хлюстова А. В., Хорев М. С. / Прикладная физика. 2008. № 5. С. 40.
22. Тазмеев Х. К., Тимеркаев Б. А., Тазмеев Г. Х., Сарваров Ф. С., Арсланов И. М. / Прикладная физика. 2015. № 2. С. 58.
23. Chistolinov A. V., Yakushin R. V., Sargsyan M. A., Khromov M. A., Perfilieva A. V. / Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1556. P. 012090.
24. Chistolinov A. V., Yakushin R. V., Perfilieva A. V., Sargsyan M. A., Gadzhiev M. Kh., Tyuftyaev A. S. / Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1698. P. 012020.
25. Chistolinov A. V., Khromov M. A., Yakushin R. V., Gadzhiev M. Kh., Tyuftyaev A. S. / Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2100. P. 012025.
26. Чистолинов А. В., Тюфтяев А. С., Гаджиев М. Х. / Прикладная физика. 2021. № 5. С. 5.
27. Чистолинов А. В., Якушин Р. В., Перфильева А. В. / Прикладная физика. 2022. № 1. С. 12.
28. Чистолинов А. В., Якушин Р. В., Лубин А. А., Перфильева А. В. / Прикладная физика. 2024. № 4. С. 5.
29. Sirotkin N. A., Titov V. A. / Plasma Phys. Tech. 2016. Vol. 3. № 3. P. 126.
30. Bruggeman P., Ribezl E., Maslani A., Degroote J., Malesevic A., Rego R., Vierendeels J., Leys C. / Plasma Sources Sci. Technol. 2008. Vol. 17. № 2. P. 025012.
31. Raffel M., Willert C. E., Scarano F., Kähler C. J., Wereley S. T., Kompenhans J. Particle Imaging Velocimetry A Practical Guide. – Springer, 2018.

PACS: 47.80.Jk, 52.70.Kz, 52.80.-s

Investigation of gas flows created by a discharge with a liquid electrolyte cathode

A. V. Chistolinov^{1,*}, P. N. Kazansky¹, R. V. Yakushin², V. M. Chepelev¹ and A. S. Tyuftyaev¹

¹ Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia

* E-mail: a-chi@yandex.ru

² Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, 125047 Russia

Received 14.03.2025; revised 4.04.2025; accepted 20.10.2025

The discharge with a liquid electrolyte cathode at atmospheric pressure in the air was studied using PIV and high-speed photography methods. The velocity field of the gas flows created by the discharge was found. It was shown that the gas flow created by the discharge moves down along the discharge channel to the surface of the solution, reaching a maximum velocity near its surface. Meeting with the surface of the solution, the gas begins to spread along it in a thin layer about two millimeters thick. Thus, it was found that the components of the solution transferred from the solution to the gas phase under the action of a discharge with a liquid cathode are removed from the discharge zone in a horizontal direction, along the surface of the solution.

Keywords: Particle Image Velocimetry (PIV); gas flows; electric discharge; liquid cathode; atmospheric pressure; air; transfer of solution components to the gas phase.

REFERENCES

1. Bruggeman P., Frontiera R., Kortshagen U., Kushner M., Linic S., Schatz G., Andaraarachchi H., Exarhos S., Jones L., Mueller C., Rich C., Xu C., Yue Y. and Zhang Y., *J. Appl. Phys.* **129**, 200902 (2021).
2. Maksimov A. I. Physicochemical properties of plasma-solution systems and the possibilities of their technological applications. Encyclopedia of low-temperature plasma. Vol. 11 chapter 5 / Ed. Lebedev Yu. A., Plate N. A., Fortov V. E. Moscow, Janus-K, 2006 [in Russian].
3. Kutepov A. M., Zakharov A. G. and Maksimov A. I. Vacuum-plasma and plasma-solution modification of polymeric materials. Moscow, Nauka, 2004 [in Russian].
4. Yang Y., Cho Y. I. and Fridman A. Plasma Discharge in Liquid: Water Treatment and Applications. CRC Press, 2012.
5. Ren J., Yao M., Yang W., Li Y. and Gao J., *Centr. Eur. J. Chem.* **12** (12), 1213 (2014).
6. Rezaei F., Vanraes P., Nikiforov A., Morent R. and De Geyter N., *Materials* **12** (17), 2751 (2019).
7. Malik M. A., *Plasma Chem. Plasma Proc.* **30**, 21 (2010).
8. Mezei P. and Cserfalvi T., *Appl. Spectr. Rev.* **42**, 573 (2007).
9. Webb M. R., Andrade F. J., Gamez G., McCrindle R. and Hieftje G. M., *J. Anal. At. Spectrom.* **20**, 1218 (2005).
10. Bencs L., Laczai N., Mezei P. and Cserfalvi T., *Spectrochim. Acta, Part B.* **107**, 139 (2015).
11. Choi H. S., Shikova T. G., Titov V. A. and Rybkin V. V., *J. Coll. Interface Sci.* **300**, 640 (2006).
12. Joshi R., Schulze R.-D., Meyer-Plath A. and Friedrich J., *Plasma Proc. Polym.* **5**, 695 (2008).
13. Saito G. and Akiyama T., *J. Nanomat.* **2015**, 123696 (2015).
14. Mariotti D. and Sankaran R. M., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43**, 323001 (2010).
15. Surov O. V., Voronova M. I., Titov V. A. and Zakharov A. G., *Applied Physics*, № 1, 17 (2021) [in Russian].
16. Bruggeman P. and Leys C., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42** (5), 1 (2009).
17. Bruggeman P., Liu J., Degroote J., Kong M. G., Vierendeels J. and Leys C., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41**, 215201 (2008).
18. Vanraes P. and Bogaerts A., *Applied Physics Reviews* **5**, 031103 (2018).
19. Verreycken T., Schram D. C., Leys C. and Bruggeman P., *Plasma Sources Sci. Technol.* **19**, 045004 (2010).
20. Gaisin A. F. and Son E. E., *High Temperature* **43** (1), 1 (2005).
21. Maximov A. I., Khlyustova A. V. and Khorev M. S., *Applied Physics*, № 5, 40 (2008) [in Russian].
22. Tazmeev Kh. K., Timerkaev B. A., Tazmeev G. Kh., Sarvarov F. S. and Arslanov I. M., *Applied Physics*, № 2, 58 (2015) [in Russian].
23. Chistolinov A. V., Yakushin R. V., Sargsyan M. A., Khromov M. A. and Perfilieva A. V., *Journal of Physics: Conference Series* **1556**, 012090 (2020).
24. Chistolinov A. V., Yakushin R. V., Perfilieva A. V., Sargsyan M. A., Gadzhiev M. Kh. and Tyuftyaev A. S., *Journal of Physics: Conference Series* **1698**, 012020 (2020).
25. Chistolinov A. V., Khromov M. A., Yakushin R. V., Gadzhiev M. Kh. and Tyuftyaev A. S., *Journal of Physics: Conference Series* **2100**, 012025 (2021).
26. Chistolinov A. V., Tyuftyaev A. S. and Gadzhiev M. Kh., *Applied Physics*, № 5, 5 (2021) [in Russian].
27. Chistolinov A. V., Yakushin R. V. and Perfilieva A. V., *Applied Physics*, № 1, 12 (2022) [in Russian].
28. Chistolinov A. V., Yakushin R. V., Lubin A. A. and Perfilieva A. V., *Applied Physics*, № 4, 5 (2024) [in Russian].
29. Sirotkin N. A. and Titov V. A., *Plasma Phys. Tech.* **3** (3), 126 (2016).
30. Bruggeman P., Ribezl E., Maslani A., Degroote J., Malesevic A., Rego R., Vierendeels J. and Leys C., *Plasma Sources Sci. Technol.* **17** (2), 025012 (2008).
31. Raffel M., Willert C. E., Scarano F., Kähler C. J., Wereley S. T. and Kompenhans J. Particle Imaging Velocimetry A Practical Guide. Springer, 2018.

Об авторах

Чистолинов Андрей Владимирович, научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2). E-mail: a-chi@yandex.ru SPIN-код: 5329-3703, AuthorID: 1192062

Казанский Павел Николаевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2). E-mail: fokoo@yandex.ru SPIN-код: 7674-9889, AuthorID: 887141

Якушин Роман Владимирович, к.т.н., декан, доцент, Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева (125047, Россия, Москва, Миусская пл., 9). E-mail: yakushin@muctr.ru SPIN-код: 7201-2016, AuthorID: 724318

Чепелев Владимир Михайлович, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2). E-mail: chepelev@ihed.ras.ru SPIN-код: 3535-9857, AuthorID: 1238512

Тюфтяев Александр Семёнович, д.т.н., главный научный сотрудник, Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2). E-mail: astpl@mail.ru SPIN-код: 5341-2934, AuthorID: 40635