

Напряженность электрического поля в разряде с жидким электролитным катодом в воздухе при атмосферном давлении

А. В. Чистолинов, А. С. Тюфтяев, М. Х. Гаджиев

Измерена напряжённость электрического поля в канале разряда с жидким электролитным катодом при атмосферном давлении в воздухе в диапазоне токов 20–90 мА. Найдены зависимости напряжённости поля от величины разрядного тока для водных растворов с разным составом и с разными значениями рН, но с одной и той же удельной электропроводностью 300 мкСм/см. Показано, что эти зависимости мало отличаются друг от друга. Получена усреднённая по составу раствора зависимость напряжённости поля в разряде с жидким катодом от тока разряда.

Ключевые слова: жидкий катод, плазма, электрический разряд, напряжённость электрического поля, воздух, атмосферное давление.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-5-5-10

Введение

В последние два десятилетия наблюдается значительный рост интереса к исследованию взаимодействия электроразрядной плазмы с поверхностью жидкости и, в особенности, с поверхностью водных растворов [1–5]. В большой степени этот интерес связан с перспективами практического использования такого типа электроразрядной плазмы.

Если взаимодействие электроразрядной плазмы с поверхностью жидкости организовано таким образом, что жидкость является катодом в газовом разряде, то воздействие на жидкость оказывается наиболее сильным [1, 2]. Это обусловлено тем, что в этом случае происходит бомбардировка поверхности жидкости положительными ионами, разогнанными в

катодном слое. Величина катодного падения напряжения в таких разрядных системах достаточно велика и составляет, в зависимости от состава жидкого катода, от 400 до 800 В [4], соответственно и энергозатрат в прикатодной области велик. По этим причинам 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.

Разряд с жидким катодом представляет собой тлеющий разряд при атмосферном давлении [6]. Однако, разряд с жидким катодом гораздо сложнее и гораздо хуже изучен, чем тлеющий разряд атмосферного давления с твёрдыми электродами. В разряде с жидким катодом вблизи поверхности жидкого катода разрядный канал разделяется на отдельные филаменты, которые находятся в постоянном хаотическом движении [1, 5, 7, 8]. В разряде с жидким катодом происходит интенсивный перенос компонентов раствора в газовую фазу под действием ионной бомбардировки поверхности раствора [4, 6, 8].

Чистолинов Андрей Владимирович, н.с.

E-mail: a-chi@yandex.ru

Тюфтяев Александр Семёнович, гл.н.с., д.т.н.

Гаджиев Махач Хайрудинович, зав. лаб., с.н.с., к.ф.-м.н.

Объединенный институт высоких температур РАН.
Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

Статья поступила в редакцию 01 октября 2021 г.

© Чистолинов А. В., Тюфтяев А. С., Гаджиев М. Х., 2021

Исследование разряда с жидким катодом осложняется зависимостью его параметров от состава раствора, который в свою очередь может изменяться под действием самого разряда.

Одним из важнейших параметров электроразрядной плазмы является напряжённость электрического поля в разрядном канале. Определение этого параметра важно, как для построения моделей разряда, так и для практических приложений. Однако, имеющихся в литературе на сегодняшний день данных [9–15] в силу их неполноты и/или недостаточной точности не хватает для определения эмпирической зависимости напряжённости электрического поля от тока разряда даже в простейшем случае малой концентрации примеси в водном растворе. Определению такой зависимости и посвящена настоящая работа.

Экспериментальная установка и методика измерений

В ходе выполнения работы использовалась экспериментальная установка, в которой разряд постоянного тока создавался между стержневым металлическим электродом и поверхностью раствора при атмосферном давлении в воздушной проточной разрядной ячейке. В качестве электрода использовался вольфрамовый стержень диаметром 2 мм с радиусом закругления кончика 1 мм. Расстояние между стержневым электродом и поверхностью жидкости регулировалось микрометрическим винтом. Ток разряда поддерживался в течение всего эксперимента источником питания с погрешностью $\pm 1\%$. Измерение напряжения на разрядной ячейке осуществлялось мультиметром АМ-1118, подключённым к разрядной ячейке через высоковольтный делитель напряжения ДНВ. Измерение тока через разрядную ячейку осуществлялось мультиметром DT9208A.

Для проведения корректных электрофизических измерений, необходимо, чтобы параметры раствора оставались неизменными в течение всего эксперимента. Для того, чтобы обеспечить постоянство состава и температуры раствора, была организована его циркуляция через разрядную ячейку объёмом 100 мл со скоростью 330 мл/мин, т. е. раствор в разрядной ячейке обновлялся каждые 18 с. Рас-

твор, поступающий в разрядную ячейку, приготавливался в реальном режиме времени. Для его приготовления использовалась деионизированная вода, которая поступала непосредственно из системы водоподготовки «Спектр ОСМОС», и концентрированные растворы химически чистых реагентов, которые добавлялись в поток деионизированной воды перистальтическими насосами в необходимой пропорции. Это с одной стороны обеспечивало стабильность состава раствора в разрядной ячейке, а с другой стороны позволяло менять состав раствора в процессе эксперимента. Электрохимические показатели раствора измерялись на входе в разрядную ячейку. Проводимость раствора измерялась кондуктометром «Эксперт-002», рН раствора анализатором жидкости «Эксперт-001-3.0.4». Температура раствора на входе в разрядную ячейку составляла $14 \pm 2^\circ\text{C}$.

Для проведения экспериментов использовались 3 раствора с электропроводностью 300 мкСм/см (что соответствует электропроводности питьевой воды хорошего качества), но с разными составами и разными значениями рН:

1. Раствор NaNO_3 с рН = 5,3.
2. Раствор NaOH с рН = 11,3.
3. Раствор HNO_3 с рН = 3,6.

Скоростная цветная фотосъёмка разряда с жидким катодом проводилась фотоаппаратом Nikon D500 с временем экспозиции одного кадра 125 мкс.

Для определения напряжённости электрического поля в разрядном канале для каждого раствора с заданным составом при заданном разрядном токе строилась зависимость падения напряжения на разрядной ячейке от расстояния между электродом и поверхностью раствора [6]. Поскольку эта зависимость с точностью до погрешности измерений совпадает с линейной [6, 10], напряжённость поля в разрядном канале разряда с жидким катодом определяется как тангенс угла наклона этой прямой. Для того, чтобы исключить погрешности, связанные с приэлектродными процессами, в частности с наличием филаментированной части разрядного канала вблизи поверхности жидкого катода, эта зависимость строилась для расстояний между электродом и поверхностью жидкости в интервале от 3 до 10 мм.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Для определения высоты зоны филаментации разрядного канала разряда с жидким катодом использовалась скоростная фото­съёмка. Данные скоростной фотосъёмки показали, что высота зоны филаментации разрядного канала с жидким катодом практически не зависит от расстояния между электродом и поверхностью жидкости при постоянном токе разряда (рис. 1). То есть, при увеличении расстояния между электродом и поверхностью раствора происходит только удлинение неразветвлённой части разрядного канала.

С ростом же разрядного тока высота зоны филаментации несколько возрастает, однако в

исследованном диапазоне токов она не превышает 1,5 мм. Это означает, что описанная в предыдущей части методика нахождения напряжённости электрического поля в разряде с жидким катодом вполне корректна и позволяет определить напряжённость поля в неразветвлённой части разрядного канала.

Линейная зависимость падения напряжения от длины разрядного промежутка строилась методом наименьших квадратов в каждом случае по 8 точкам (от 3 мм до 10 мм через каждый миллиметр) для разрядных токов от 20 до 90 мА через каждые 10 мА. Напряжённость электрического поля E для каждого разрядного тока I определялась как тангенс угла наклона этой линейной зависимости. Результаты для трёх исследованных растворов представлены на рис. 2.



Рис. 1. Разряд с жидким катодом. Раствор NaOH с электропроводностью 300 мкСм/см и pH = 11,3. Ток разряда 40 мА. Расстояние между электродом и поверхностью жидкости 4, 6 и 8 мм соответственно.

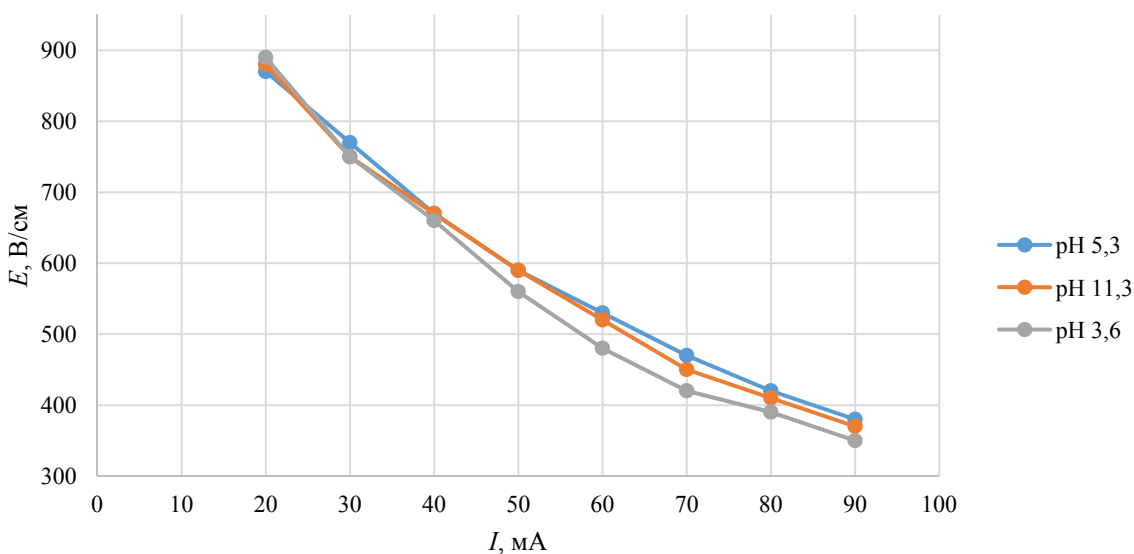


Рис. 2. Зависимость напряжённости электрического поля E в разрядном канале разряда с жидким катодом от тока разряда I для разных растворов при электропроводности 300 мкСм/см.

Известно, что в разрядах постоянного тока с жидким катодом происходит ионная бомбардировка поверхности жидкого катода, в результате которой происходит перенос в том числе нелетучих компонентов раствора в зону плазмы [4]. В связи с этим, можно было ожидать, что напряжённость электрического поля в разрядном канале будет зависеть от наличия в растворе легкоионизируемой примеси натрия. Однако, как показали результаты эксперимента, напряжённости поля для всех трёх растворов для токов в диапазоне 20–90 мА оказалась очень близки (рис. 2).

В первом приближении можно пренебречь небольшим различием в напряжённости

поля для разных составов раствора и провести усреднение по всем трём экспериментам. Тогда можно получить среднее значение напряжённости поля для разряда с жидким катодом при электропроводности раствора 300 мкСм/см (рис. 3).

Было установлено, что зависимость такой усреднённой напряжённости электрического поля E от разрядного тока I в диапазоне токов 20–90 мА хорошо аппроксимируется следующей квадратичной зависимостью $E = 1140 - 14,5 \times I + 0,066 \times I^2$, где E указано в В/см, а I – в мА. Коэффициент достоверности этой аппроксимации составляет 0,9996.

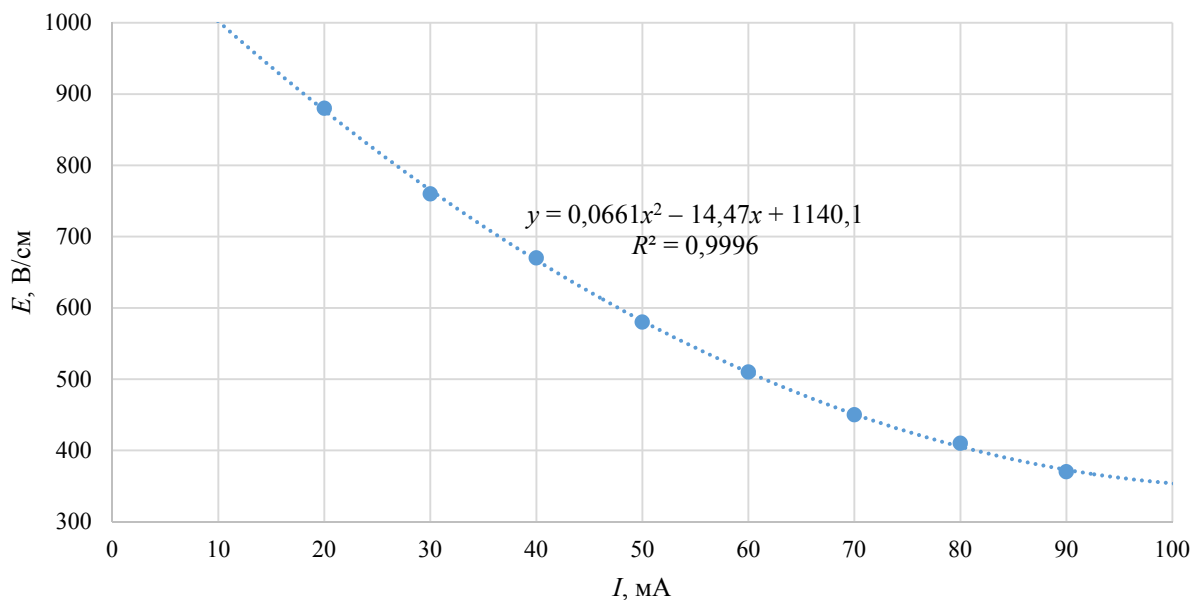


Рис. 3. Зависимость усреднённой напряжённости электрического поля в разрядном канале разряда с жидким катодом от тока разряда при электропроводности 300 мкСм/см с аппроксимирующей функцией.

На основании этой зависимости, используя данные о газовой температуре в разрядном канале [11, 12] может быть найдена зависимость приведённой напряжённости электрического поля в разряде с жидким катодом от тока разряда.

Заключение

Измеренные зависимости напряжённости электрического поля в канале разряда с жидким катодом от величины разрядного тока при разных составах и различных значениях рН жидкого катода при удельной электропро-

водности жидкого катода 300 мкСм/см в диапазоне токов 20–90 мА мало отличаются друг от друга. Найдена квадратичная функция, аппроксимирующая зависимость усреднённой напряжённости поля от величины разрядного тока при температуре раствора 14 ± 2 °С с коэффициентом достоверности аппроксимации 0,9996. Поскольку предложенная аппроксимирующая функция позволяет рассчитать напряжённость поля в разрядном канале разряда с жидким катодом вдали от электродов при отсутствии влияния легкоионизируемых примесей из раствора электролита, то её область применимости в действительности го-

раздо шире, чем те условия, при которых она получена. В частности, можно ожидать хорошего совпадения предсказаний аппроксимирующей функции с экспериментальными данными в области токов менее 20 мА (где квадратичный член менее значим по сравнению с линейным), а также в области проводимости растворов ниже 300 мкСм/см (т. е. при более низкой концентрации примесей). В области токов более 90 мА функция имеет нефизический минимум при токе равном 110 мА, что, по-видимому, определяет верхнюю границу её применимости по току в районе 100 мА. Граница применимости функции в области проводимостей растворов выше 300 мкСм/см должна быть определена экспериментально.

Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда
(проект № 21-79-30062).

ЛИТЕРАТУРА

1. Bruggeman P., Kushner M., Locke B., Gardeniers J., Graham W., Graves D., Hofman-Caris R., Maric D., Reid J., Ceriani E., Rivas D., Foster J., Garrick S., Gorbanev Y., Hamaguchi S., Iza F., Jablonowski H., Klimova E., Kolb J., Krcma F., Lukes P., Machala Z., Marinov I., Mariotti D., Thagard S., Minakata D., Neyts E., Pawlat J., Petrovic Z., Pflieger R., Reuter S., Schram D., Schröter S., Shiraiwa M., Tarabová B., Tsai P., Verlet J., Woedtke T., Wilson K., Yasui K., Zvereva G. // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2016. Vol. 25. P. 053002.

2. Vanraes P., Bogaerts A. // *Applied Physics Reviews*. 2018. Vol. 5. P. 031103.

3. 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.

4. Кутенов А. М., Захаров А. Г., Максимов А. И. Вакуумно-плазменное и плазменно-растворное модифицирование полимерных материалов. – М.: Наука, 2004.

5. Bruggeman P., Leys C. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2009. Vol. 42. № 5. P. 1.

6. 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. Ю. А. Лебедева, Н. А. Платэ, В. Е. Фортова. – М.: Янус-К, 2006.

7. Chistolov A. V., Yakushin R. V., Sargsyan M. A., Khromov M. A., Tyufyaev A. S. // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1394. P. 012006.

8. Chistolov A. V., Yakushin R. V., Sargsyan M. A., Khromov M. A., Perfilieva A. V. // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1556. P. 012090.

9. Шукуров А. Л., Манукян А. С., Шутков Д. А., Рыбкин В. В. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2016. Т. 59. № 12. С. 4.

10. Гайсин А. Ф., Сон Э. Е. // *ТВТ*. 2005. Т. 43. № 1. С. 5.

11. 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.

12. Bruggeman P., Liu J., Degroote J., Kong M. G., Vierendeels J., Leys Ch. // *J. Phys. D Appl. Phys.* 2008. Vol. 41. P. 215201.

13. Сироткин Н. А., Титов В. А. // *Прикладная физика*. 2016. № 6. С. 25.

14. Шуаибов А. К., Чучман М. П., Козак Я. Ю. // *Успехи прикладной физики*. 2014. Т. 2. № 1. С. 41.

15. Тазмеев Г. Х., Тимеркаев Б. А., Тазмеев Х. К., Арсланов И. М. // *Прикладная физика*. 2016. № 1. С. 72.

PACS: 52.70.Ds

Electric field strength in a discharge with a liquid electrolyte cathode in air at atmospheric pressure

A. V. Chistolov, A. S. Tyufyaev, and M. Kh. Gadzhiev

Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences
Bld. 2, 13 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia
E-mail: a-chi@yandex.ru

Received October 01, 2021

The electric field strength in the channel of a discharge with a liquid electrolyte cathode at atmospheric pressure in air with the current in range of 20–90 mA is measured. The dependenc-

es of the electric field strength on the value of the discharge current are found for aqueous solutions with different compositions and with different pH values, but with the same specific conductivity of 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$. It is shown that these dependences don't differ by much from each other. The dependence of the electric field strength in a discharge with a liquid cathode on the discharge current, averaged over the composition of the solution, is obtained.

Keywords: liquid cathode, plasma, electric discharge, electric field strength, air, atmospheric pressure.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-5-5-10

REFERENCES

1. P. Bruggeman, M. Kushner, B. Locke, J. Gardeniers, W. Graham, D. Graves, R. Hofman-Caris, D. Maric, J. Reid, E. Ceriani, D. Rivas, J. Foster, S. Garrick, Y. Gorbanev, S. Hamaguchi, F. Iza, H. Jablonowski, E. Klimova, J. Kolb, F. Krema, P. Lukes, Z. Machala, I. Marinov, D. Mariotti, S. Thagard, D. Minakata, E. Neyts, J. Pawlat, Z. Petrovic, R. Pflieger, S. Reuter, D. Schram, S. Schröter, M. Shiraiwa, B. Tarabová, P. Tsai, J. Verlet, T. Woedtke, K. Wilson, K. Yasui and G. Zvereva, *Plasma Sources Sci. Technol.* **25**, 053002 (2016).
2. P. Vanraes and A. Bogaerts, *Applied Physics Reviews* **5**, 031103 (2018).
3. P. Bruggeman, R. Frontiera, U. Kortshagen, M. Kushner, S. Linic, G. Schatz, H. Andaraarachchi, S. Exarhos, L. Jones, C. Mueller, C. Rich, C. Xu, Y. Yue and Y. Zhang, *J. Appl. Phys.* **129**, 200902 (2021).
4. A. M. Kutepov, A. G. Zakharov, and A. I. Maksimov, *Vacuum-plasma and plasma-solution modification of polymeric materials*. (Nauka, Moscow, 2004) [in Russian].
5. P. Bruggeman and C. Leys, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42** (5), 1 (2009).
6. A. I. Maksimov, Physicochemical properties of plasma-solution systems and the possibilities of their technological applications. *Encyclopedia of low-temperature plasma*. vol. **11** chapter 5 ed. Yu. A. Lebedev, N. A. Plate and V. E. Fortov (Moscow: Janus-K, 2006) [in Russian].
7. A. V. Chistolinov, R. V. Yakushin, M. A. Sargsyan, M. A. Khromov, and A. S. Tyuftyaev, *Journal of Physics: Conference Series* **1394**, 012006 (2019).
8. A. V. Chistolinov, R. V. Yakushin, M. A. Sargsyan, M. A. Khromov, and A. V. Perfilieva, *Journal of Physics: Conference Series* **1556**, 012090 (2020).
9. A. L. Choukourov, A. S. Manukyan, V. V. Rybkin, and D. A. Shutov, *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* **59** (12), 4 (2016).
10. A. F. Gaisin and E. E. Son, *High Temperature* **43** (1), 1 (2005).
11. P. Bruggeman, E. Ribezl, A. Maslani, J. Degroote, A. Malesevic, R. Rego, J. Vierrendeels, and C. Leys, *Plasma Sources Sci. Technol.* **17** (2), 025012 (2008).
12. P. Bruggeman, J. Liu, J. Degroote, M. G. Kong, J. Vierrendeels, and C. Leys, *J. Phys. D Appl. Phys.* **41**, 215201 (2008).
13. N. A. Sirotkin and V. A. Titov, *Applied Physics*, No. 6, 25 (2016) [in Russian].
14. A. K. Shuaibov, M. P. Chuchman, and Ya. Yu. Kozak, *Usp. Prikl. Fiz.* **2** (1), 41 (2014).
15. G. Kh. Tazmeev, B. A. Timerkaev, Kh. K. Tazmeev, and I. M. Arslanov, *Applied Physics*, No. 1, 72 (2016) [in Russian].