

## Свечение второй положительной системы молекулярного азота в разряде с жидким электролитным катодом вблизи поверхности катода в воздухе при атмосферном давлении

*А. В. Чистолинов, Р. В. Якушин, А. В. Перфильева*

*Измерена интенсивность свечения второй положительной системы азота вблизи поверхности раствора в разряде с жидким электролитным катодом при атмосферном давлении в воздухе для водных растворов разного состава. Показано, что интенсивность свечения для всех исследованных растворов сильно падает с ростом разрядного тока от 20 до 100 мА. Показано, что для этих растворов при всех разрядных токах вращательная и колебательная температуры, определённые по молекулярному азоту, идентичны и равны соответственно 2400 и 3800 К. Обсуждаются возможные причины различия в интенсивности свечения второй положительной системы азота при одинаковых температурах.*

*Ключевые слова:* жидкий катод, плазма, электрический разряд, воздух, атмосферное давление, спектроскопия, интенсивность свечения, вторая положительная система азота, вращательная и колебательная температуры.

**DOI:** 10.51368/1996-0948-2022-1-12-18

### Введение

Различные разряды, контактирующие с жидкостью и в частности, разряд с жидким электролитным катодом, в качестве которого используется водный раствор электролита находят практическое применение в методах очистки воды от органических примесей, модифицировании поверхности полимерных материалов, стерилизации водных растворов, спектральном анализе растворов на содержание металлов, синтезе наноматериалов и многих других приложениях [1–14]. Это является

стимулом для научных исследований такого типа разрядов [15–28].

В разряде с жидким катодом поверхность раствора подвергается ионной бомбардировке, что приводит к интенсивному переносу компонентов раствора в газовую фазу. По данным работы [23] в газовую фазу переносится, в зависимости от условий разряда, от 300 до 500 молекул воды на один падающий ион. 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 [12–14, 20, 26].

Перенос вещества в газовую фазу в разряде с жидким катодом во многом аналогичен процессу катодного распыления в тлеющем разряде с твёрдыми электродами, однако, происходит намного более интенсивно. Это связано, в частности с тем, что величина катодного падения потенциала в разряде с жидким электролитным катодом значительно выше, чем с твёрдым металлическим катодом и составляет, в зависимости от состава жидкого катода, от 400 до 800 В [2].

---

**Чистолинов Андрей Владимирович**<sup>1</sup>, н.с.

E-mail: a-chi@yandex.ru

**Якушин Роман Владимирович**<sup>2</sup>, декан, доцент, к.т.н.

**Перфильева Анна Владимировна**<sup>2</sup>, уч. секр., н.с., к.т.н.

<sup>1</sup> Объединенный институт высоких температур РАН.

Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

<sup>2</sup> Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева.

Россия, 125047, Москва, Миусская пл., 9.

*Статья поступила в редакцию 13 декабря 2021 г.*

---

© Чистолинов А. В., Якушин Р. В., Перфильева А. В., 2022

В отличие от разряда с твёрдыми металлическими электродами, при тех же условиях, в разряде с жидким электролитным катодом вблизи поверхности жидкого катода разрядный канал разделяется на отдельные филаменты, при этом каждый филамент заканчивается собственным катодным пятном на поверхности раствора. Количество этих филаментов и площадь зоны, занимаемой катодными пятнами на поверхности раствора, растёт с ростом разрядного тока [29]. И филаменты и катодные пятна находятся в постоянном хаотическом движении с характерными газодинамическими скоростями порядка 1 м/с. Предполагается, что это движение обусловлено наличием струй неравновесного пара, истекающих из катодных пятен [30, 31].

Хаотически меняется не только положение филаментов и катодных пятен в пространстве, но и их форма и количество. Что значительно затрудняет исследование и моделирование прикатодных процессов в разряде с жидким электролитным катодом.

Если разряд с жидким катодом происходит в воздухе, то в его эмиссионном спектре вблизи поверхности жидкого катода всегда наблюдаются полосы второй положительной системы молекулярного азота. Эти полосы, наряду с полосами излучения ОН радикала, имеют большое значение для диагностики плазмы разряда, так как позволяют определить вращательную и колебательную температуры молекулярных компонент [29].

К сожалению, большинство спектральных исследований разряда с жидким катодом проводится без пространственного разрешения, за редким исключением [29, 32–34], что затрудняет воссоздание детальной картины этого явления. В настоящее время зависимость излучения второй положительной системы молекулярного азота вблизи поверхности раствора в разряде с жидким катодом от параметров разряда и состава раствора практически не изучена. Исследованию этого вопроса и посвящена настоящая работа.

### **Экспериментальная установка и методика измерений**

В ходе выполнения работы использовалась экспериментальная установка, описанная в работе [35]. В этой установке разряд посто-

янного тока создавался между стержневым вольфрамовым электродом диаметром 2 мм и поверхностью раствора при атмосферном давлении в воздухе в проточной разрядной ячейке. Радиус кончика электрода – 1 мм. Расстояние между металлическим электродом и поверхностью раствора во всех экспериментах составляло 2 мм.

Циркуляция раствора осуществлялась через разрядную ячейку объёмом 100 мл со скоростью 330 мл/мин. Таким образом, раствор в разрядной ячейке постоянно обновлялся. Температура раствора на входе в разрядную ячейку составляла  $14 \pm 2$  °С. Для приготовления раствора использовалась деионизированная вода и концентрированные растворы химически чистых реагентов.

Всего для проведения экспериментов использовались 3 раствора:

1. Раствор  $\text{HNO}_3$  с  $\text{pH} = 3,1$  и электропроводностью 300 мкСм/см.
2. Раствор  $\text{NaNO}_3$  с  $\text{pH} = 4,7$  и электропроводностью 300 мкСм/см.
3. Раствор  $\text{NaNO}_3$  с  $\text{pH} = 3,1$  и электропроводностью 1100 мкСм/см.

Растворы были подобраны таким образом, чтобы два из них имели разное значение  $\text{pH}$  (3,1 и 4,7) при одной и той же электропроводности равной 300 мкСм/см, и два из них имели разное значение электропроводности (300 и 1100 мкСм/см) при одном и том же значении  $\text{pH}$  равном 4,7.

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

Для получения спектров в выбранной зоне разряда (вблизи поверхности жидкого катода) использовался трехканальный спектрометр Avaspec 2048 с диапазоном длин волн 200–1100 нм со спектральным разрешением 0,15 нм. Для этого изображение разряда проецировалось кварцевой линзой в масштабе 1:1 на плоскость, в которой с помощью микрометрических винтов осуществлялось перемещение входного отверстия световода спектрометра диаметром 100 мкм. Съёмка спектров производилась на оси разряда вблизи поверхности жидкого катода.

Колебательная и вращательная температуры молекулярного азота определялись пу-

тём моделирования его спектра излучения с помощью программы Sreair [36].

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

Расшифровка эмиссионных спектров плазмы разряда показала наличие в них полос излучения ОН-радикалов, молекулярного азота  $N_2(2+)$  и  $N_2(1+)$ , молекулярного иона  $N_2^+$ , полосы которого очень слабы на фоне полос молекулярного азота, а также линий атомарного водорода H $\alpha$  и H $\beta$  и кислорода OI. Линии натрия при данных условиях в спектре разряда не обнаруживаются.

Определение колебательной и вращательной температур по эмиссионному спектру второй положительной системы молекулярного азота проводилось для диапазона длин волн

340–360 нм (рис. 1). Этот диапазон удобен тем, что здесь отсутствует наложение полос ОН радикала, а полосы молекулярного иона  $N_2^+$  гораздо слабее полос молекулярного азота.

Для определения диаметра зоны филаментации и общего вида структуры канала разряда с жидким катодом вблизи поверхности жидкого катода использовалась скоростная фотосъёмка (рис. 2). Диаметр зоны филаментации определялся для каждого кадра, а затем проводилось усреднение по большому количеству кадров (по 100 кадрам для каждого значения тока разряда). Полученный таким образом диаметр зоны филаментации вблизи поверхности раствора приблизительно линейно растёт с ростом тока разряда. Похожая зависимость диаметра зоны филаментации от разрядного тока получена в работе [29].

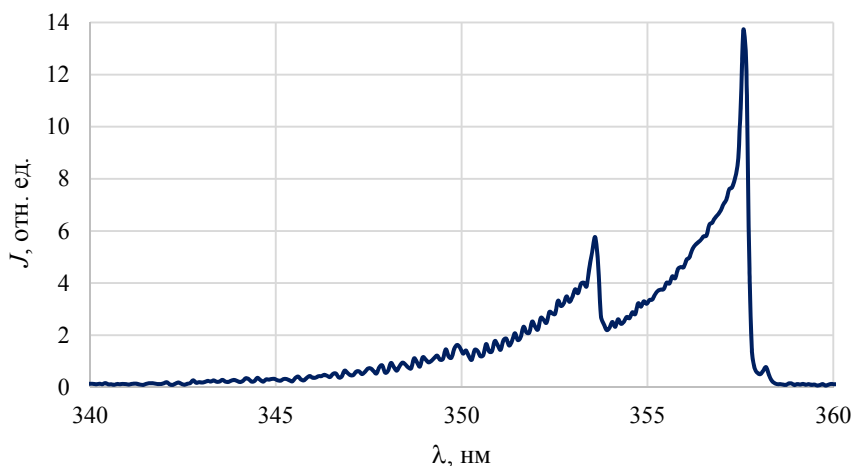


Рис. 1. Спектр разряда с жидким катодом вблизи поверхности раствора в диапазоне длин волн 340–360 нм при токе разряда 40 мА. Раствор  $HNO_3$   $pH=3,1$  электропроводность 300 мкСм/см



Рис. 2. Разряд с жидким катодом. Раствор  $HNO_3$  с электропроводностью 300 мкСм/см и  $pH=3,1$ . Расстояние между электродом и поверхностью жидкости 2 мм. Ток разряда 20, 40 и 80 мА соответственно

В проведённых экспериментах для трёх растворов исследовалась зависимость интенсивности свечения второй положительной системы азота, а также колебательной и вращательной температур, определённых по мо-

лекулярному азоту, от тока разряда вблизи поверхности раствора в разряде с жидким катодом. Измерения проводились при токах разряда от 20 до 100 мА через каждые 20 мА. Время экспозиции при спектральных измере-

ниях составляло 2 с, то есть, снимался усреднённый по времени спектр, без временного разрешения. Интенсивность свечения определялась по спектральному максимуму излучения на длине волны 357 нм.

Результаты измерения интенсивности свечения второй положительной системы азота для трёх исследованных растворов представлены на рис. 3.

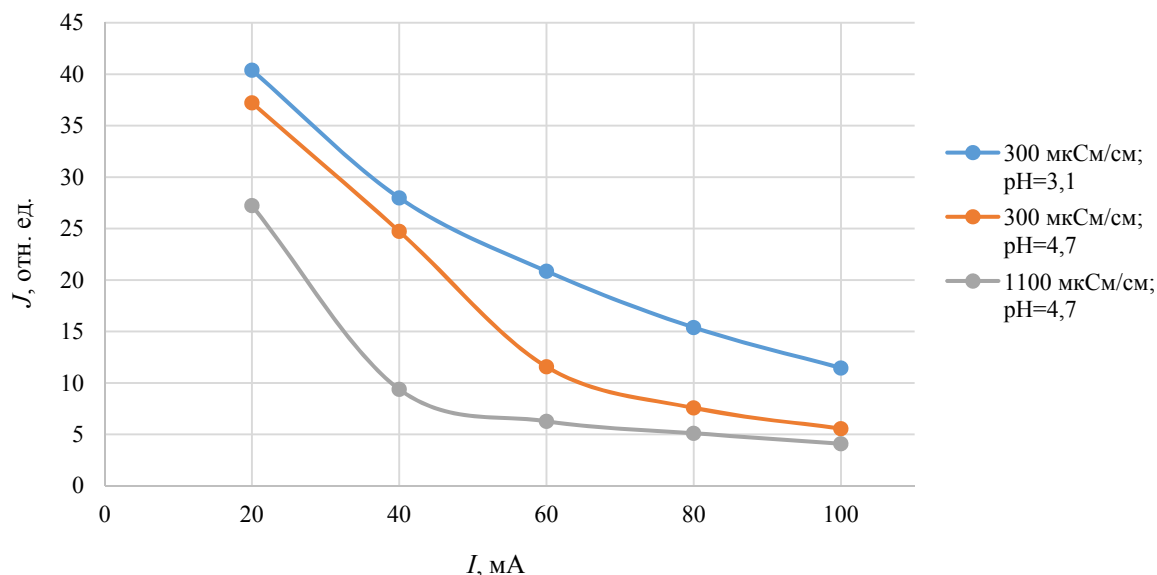
Как видно из рис. 3 для разряда с жидким катодом вблизи поверхности раствора имеют место значительные различия в интенсивности свечения второй положительной системы азота, как для разных растворов, так и для разных разрядных токов:

1. Интенсивность свечения второй положительной системы азота вблизи поверхно-

сти раствора при всех исследованных составах падает с ростом разрядного тока в диапазоне токов: 20–100 мА.

2. Интенсивность свечения второй положительной системы азота вблизи поверхности раствора при неизменном  $pH = 4,7$  падает с увеличением проводимости раствора от 300 до 1100 мкСм/см. Причём, наиболее сильно этот эффект проявляется в диапазоне токов 20–60 мА.

3. Интенсивность свечения второй положительной системы азота вблизи поверхности раствора при неизменной проводимости раствора равной 300 мкСм/см падает с увеличением  $pH$  от 3,1 до 4,7. Причём, наиболее сильно этот эффект проявляется в диапазоне токов 60–100 мА.



**Рис. 3.** Зависимость интенсивности свечения  $J$  второй положительной системы азота в разряде с жидким катодом вблизи поверхности раствора от тока разряда  $I$  для растворов с разными электрофизическими параметрами.

Однако, несмотря на различия в интенсивности второй положительной системы азота, моделирование спектров в программе Spesair, показало идентичность температур с точностью до погрешности определения для всех исследованных растворов для всего диапазона исследованных токов. Согласно результатам моделирования, вращательная температура вблизи поверхности раствора в разряде с жидким катодом равна 2400 К, колебательная 3800 К. Относительная погрешность определения обеих температур  $\pm 10\%$ .

Полученные нами значения, хорошо согласуются со значениями вращательной и ко-

лебательной температуры молекулярного азота вблизи поверхности раствора полученными в работе [29], где исследовался разряд с жидким электролитным катодом с проводимостью раствора 510 мкСм/см, при расстоянии между электродом и поверхностью раствора 5 мм.

Значительное падение интенсивности свечения второй положительной системы азота вблизи поверхности раствора с ростом разрядного тока при неизменной вращательной и колебательной температуре требует объяснения.

Это падение могло бы быть связано с ростом диаметра зоны филаментации вблизи

поверхности раствора с ростом разрядного тока. Однако, в этом случае, с ростом разрядного тока вблизи поверхности раствора должна падать интенсивность свечения и других компонент плазмы разряда с жидким катодом. Для проверки этой гипотезы нами была измерена интенсивность свечения полос ОН радикала вблизи поверхности раствора при разных токах разряда. Эти измерения показали, что интенсивность свечения полос ОН радикала вблизи поверхности раствора практически не зависит от величины разрядного тока в диапазоне исследованных токов. Что плохо согласуется с этой гипотезой.

Падение интенсивности свечения второй положительной системы азота с ростом разрядного тока может быть связано с падением концентрации азота вблизи поверхности раствора. Известно, что с ростом разрядного тока растёт поток водяного пара с поверхности раствора [23], что должно приводить к снижению концентрации азота в зоне разряда и соответственно к снижению интенсивности свечения молекулярного азота. Другая возможная причина снижения интенсивности свечения второй положительной системы азота при неизменной вращательной и колебательной температурах – снижение электронной температуры вблизи поверхности раствора с ростом разрядного тока. Эта возможность должна быть экспериментально проверена.

### Заключение

Измеренная интенсивность свечения второй положительной системы азота вблизи поверхности раствора в разряде с жидким катодом при атмосферном давлении в воздухе для растворов с разным составом, разным значением pH и электропроводностью падает с ростом тока разряда в диапазоне токов от 20 до 100 мА. Для раствора  $\text{HNO}_3$  с  $\text{pH} = 3,1$  и электропроводностью 300 мкСм/см отношение интенсивностей при токах 20 и 100 мА составляет 3,5. Для растворов  $\text{NaNO}_3$  с  $\text{pH} = 4,7$  при электропроводностях 300 и 1100 мкСм/см отношение интенсивностей при тех же токах составляет 6,7.

Вращательная и колебательная температуры, определённые по молекулярному азоту, оказываются для всех этих растворов при всех исследованных разрядных токах идентичными и равными соответственно 2400 и 3800 К.

Снижение интенсивности свечения второй положительной системы азота вблизи поверхности раствора с ростом разрядного тока при неизменной вращательной и колебательной температурах может быть обусловлено двумя причинами: снижением электронной температуры и снижением концентрации азота в плазме разряда, связанной с возрастанием потока водяного пара с поверхности раствора с ростом разрядного тока.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ № 20-08-00866 и № 20-08-00898.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Yang Y., Cho Y. I., Fridman A. Plasma Discharge in Liquid: Water Treatment and Applications. – CRC Press, 2012.
2. Кутепов А. М., Захаров А. Г., Максимов А. И. Вакуумно-плазменное и плазменно-растворное модифицирование полимерных материалов. – М.: Наука, 2004.
3. 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., Фортова В. Е. – М.: Янус-К, 2006.
4. Malik M. A. // Plasma Chem. Plasma Proc. 2010. Vol. 30. P. 21.
5. Maksimov A. I., Naumova I. K., Khlyustova A. V. // High Energy Chemistry. 2012. Vol. 46. P. 212.
6. Akishev Yu., Grushin M., Karalnik V., Trushkin N., Kholodenko A., Chugunov A., Kobzev E., Zhirkova N., Irkhina I., Kireev G. // Pure Appl. Chem. 2008. Vol. 80. P. 1953.
7. Choi H. S., Shikova T. G., Titov V. A., Rybkin V. V. // J. Coll. Interface Sci. 2006. Vol. 300. № 2. P. 640.
8. Joshi R., Schulze R.-D., Meyer-Plath A., Friedrich J. // Plasma Proc. Polym. 2008. Vol. 5. P. 695.
9. Saito G., Akiyama T. // J. Nanomat. 2015. Vol. 2015. P. 123696.
10. Mariotti D., Sankaran R. M. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. Vol. 43. № 32. P. 323001.
11. Суров О. В., Воронова М. И., Тумов В. А., Захаров А. Г. // Прикладная физика. 2021. № 1. С. 17.
12. Mezei P., Cserfalvi T. // Appl. Spectr. Rev. 2007. Vol. 42. № 6. P. 573.
13. Webb M. R., Andrade F. J., Gamez G., McCrindle R., Hieftje G. M. // J. Anal. At. Spectrom. 2005. Vol. 20. № 11. P. 1218.
14. Bencs L., Laczai N., Mezei P., Cserfalvi T. // Spectrochim. Acta, Part B. 2015. Vol. 107. P. 139.
15. 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., Krca 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.
16. Vanraes P., Bogaerts A. // *Applied Physics Reviews*. 2018. Vol. 5. P. 031103.
17. 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.
18. Bruggeman P., Leys C. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2009. Vol. 42. № 5. P. 1.
19. Кузьмичева Л. А., Титова Ю. В., Максимов А. И., Дыдыкин М. Г. // *Прикладная физика*. 2007. № 6. С. 111.
20. Максимов А. И., Хлюстова А. В., Хорев М. С. // *Прикладная физика*. 2008. № 5. С. 40.
21. Хлюстова А. В., Титов В. А. // *Прикладная физика*. 2015. № 6. С. 48.
22. Тазмеева Р. Н., Тазмеев Б. Х. // *Прикладная физика*. 2014. № 1. С. 35.
23. Сироткин Н. А., Титов В. А. // *Прикладная физика*. 2016. № 6. С. 25.
24. Тазмеев Х. К., Тимеркаев Б. А., Тазмеев Г. Х., Сарваров Ф. С., Арсланов И. М. // *Прикладная физика*. 2015. № 2. С. 58.
25. Титов В. А., Хлюстова А. В., Наумова И. К., Сироткин Н. А., Агафонов А. В. // *Прикладная физика*. 2019. № 4. С. 35.
26. Гайсин Ф. М., Сон Э. Е. *Электрофизические процессы в разрядах с твердым и жидким электродами*. – Свердловск: Изд-во Уральского ун-та, 1989.
27. Гайсин А. Ф., Сон Э. Е. // *TBT*. 2005. Т. 43. № 1. С. 5.
28. Chistolinov A. V., Yakushin R. V., Perfilieva A. V., Sargsyan M. A., Gadzhiev M. Kh., Tyufyayev A. S. // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1698. P. 012020.
29. Bruggeman P., Liu J., Degroote J., Kong M. G., Vierendeels J., Leys Ch. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2008. Vol. 41. P. 215201.
30. Chistolinov A. V., Yakushin R. V., Sargsyan M. A., Khromov M. A., Tyufyayev A. S. // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1394. P. 012006.
31. 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.
32. Mezei P., Cserfalvi T., Csillag L. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2005. Vol. 38. P. 2804.
33. Bruggeman P., Ribezl E., Maslani A., Degroote J., Malesovic A., Rego R., Vierendeels J., Leys C. // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2008. Vol. 17. № 2. P. 025012.
34. Verreycken T., Schram D. C., Leys C., Bruggeman P. // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2010. Vol. 19. P. 045004.
35. Чистолинов А. В., Тюфтяев А. С., Гаджиев М. Х. // *Прикладная физика*. 2021. № 5. С. 5.
36. Laux C. O. 2002. [www.specair-radiation.net](http://www.specair-radiation.net)

PACS: 52.70.Kz, 52.80.-c

## Emission of the second positive system of molecular nitrogen in a discharge with a liquid electrolyte cathode near the cathode surface in air at atmospheric pressure

*A. V. Chistolinov<sup>1</sup>, R. V. Yakushin<sup>2</sup>, and A. V. Perfilieva<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences  
Bld. 2, 13 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia  
E-mail: a-chi@yandex.ru

<sup>2</sup> Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia  
9 Miusskaya sq., Moscow, 125047, Russia

*Received December 13, 2021*

*The emission intensity of the second positive nitrogen system near the surface of the solution was measured in a discharge with a liquid electrolyte cathode at atmospheric pressure in air for aqueous solutions of different compositions. It was shown that the emission intensity for all investigated solutions decreases strongly with an increase in the discharge current from 20 to 100 mA. It is shown that for these solutions at all discharge currents the rotational and vibrational temperatures determined from molecular nitrogen are identical and equal to 2400 and 3800 K, respectively. Possible reasons for the difference in the emission intensity of the second positive nitrogen system at the same temperatures are discussed.*

**Keywords:** liquid cathode, plasma, electric discharge, air, atmospheric pressure, spectroscopy, emission intensity, second positive nitrogen system, rotational and vibrational temperatures.

**DOI:** 10.51368/1996-0948-2022-1-12-18

## REFERENCES

1. Y. Yang, Y. I. Cho, and A. Fridman, *Plasma Discharge in Liquid: Water Treatment and Applications* (CRC Press, 2012).
2. A. M. Kutepov, A. G. Zakharov, and A. I. Maksimov, *Vacuum-plasma and plasma-solution modification of polymeric materials* (Nauka, Moscow, 2004) [in Russian].
3. 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 (Janus-K, Moscow, 2006) [in Russian].
4. M. A. Malik, *Plasma Chem. Plasma Proc.* **30**, 21 (2010).
5. A. I. Maksimov, I. K. Naumova, and A. V. Khlyustova, *High Energy Chemistry* **46**, 212 (2012).
6. Yu. Akishev, M. Grushin, V. Karalnik, N. Trushkin, A. Kholodenko, A. Chugunov, E. Kobzev, N. Zhirkova, I. Irkhina, and G. Kireev, *Pure Appl. Chem.* **80**, 1953 (2008).
7. H. S. Choi, T. G. Shikova, V. A. Titov, and V. V. Rybkin, *J. Coll. Interface Sci.* **300**, 640 (2006).
8. R. Joshi, R.-D. Schulze, A. Meyer-Plath, and J. Friedrich, *Plasma Proc. Polym.* **5**, 695 (2008).
9. G. Saito and T. Akiyama, *J. Nanomat.* **2015**, 123696 (2015).
10. D. Mariotti and R. M. Sankaran, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43**, 323001 (2010).
11. O. V. Surov, M. I. Voronova, V. A. Titov, and A. G. Zakharov, *Applied Physics*, No. 1, 17 (2021) [in Russian].
12. P. Mezei and T. Cserfalvi, *Appl. Spectr. Rev.* **42**, 573 (2007).
13. M. R. Webb, F. J. Andrade, G. Gamez, R. McCrindle, and G.M. Hieftje, *J. Anal. At. Spectrom.* **20**, 1218 (2005).
14. L. Bencs, N. Laczai, P. Mezei, and T. Cserfalvi, *Spectrochim. Acta, Part B.* **107**, 139 (2015).
15. 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. Krma, 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, and *Plasma Sources Sci. Technol.* **25**, 053002 (2016).
16. P. Vanraes and A. Bogaerts, *Applied Physics Reviews* **5**, 031103 (2018).
17. 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).
18. P. Bruggeman and C. Leys, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42** (5), 1 (2009).
19. L. A. Kuzmicheva, J. V. Titova, A. I. Maximov, and M. G. Dydykin, *Applied Physics*, No. 6, 111 (2007) [in Russian].
20. A. I. Maximov, A. V. Khlyustova, and M. S. Khorev, *Applied Physics*, No. 5, 40 (2008) [in Russian].
21. A. V. Khlyustova and V. A. Titov, *Applied Physics*, No. 6, 48 (2015) [in Russian].
22. R. N. Tazmeev and B. Kh. Tazmeev, *Applied Physics*, No. 1, 35 (2014) [in Russian].
23. N. A. Sirotkin and V. A. Titov, *Applied Physics*, No. 6, 25 (2016) [in Russian].
24. Kh. K. Tazmeev, B. A. Timerkaev, G. Kh. Tazmeev, F. S. Sarvarov, and I. M. Arslanov, *Applied Physics*, No. 2, 58 (2015) [in Russian].
25. V. A. Titov, A. V. Khlyustova, I. K. Naumova, S. A. Sirotkin, and A. V. Agafonov, *Applied Physics*, No. 4, 35 (2019) [in Russian].
26. A. F. Gaisin and E. E. Son *Electrophysical processes in discharges with solid and liquid electrodes*. (Publishing House of the Ural University, Sverdlovsk, 1989) [in Russian].
27. A. F. Gaisin and E. E. Son, *High Temperature* **43** (1), 1 (2005).
28. A. V. Chistolinov, R. V. Yakushin, A. V. Perfilieva, M. A. Sargsyan, M. Kh. Gadzhiev, and A. S. Tyuftyaev, *Journal of Physics: Conference Series* **1698**, 012020 (2020).
29. P. Bruggeman, J. Liu, J. Degroote, M.G. Kong, J. Vierendeels, and C. Leys, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41**, 215201 (2008).
30. A. V. Chistolinov, R. V. Yakushin, M. A. Sargsyan, M. A. Khromov, and A. S. Tyuftyaev, *Journal of Physics: Conference Series* **1394**, 012006 (2019).
31. A. V. Chistolinov, R. V. Yakushin, M. A. Sargsyan, M. A. Khromov, and A. V. Perfilieva, *Journal of Physics: Conference Series* **1556**, 012090 (2020).
32. P. Mezei, T. Cserfalvi, and L. Csillag, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **38** 2804 (2005).
33. P. Bruggeman, E. Ribezl, A. Maslani, J. Degroote, A. Malesevic, R. Rego, J. Vierendeels, and C. Leys, *Plasma Sources Sci. Technol.* **17** (2), 025012 (2008).
34. T. Verreycken, D. C. Schram, C. Leys, and P. Bruggeman, *Plasma Sources Sci. Technol.* **19**, 045004 (2010).
35. A. V. Chistolinov, A. S. Tyuftyaev, and M. Kh. Gadzhiev, *Applied Physics*, No. 5, 5 (2021) [in Russian].
36. C. O. Laux, (2002) [www.specair-radiation.net](http://www.specair-radiation.net)