

УДК 533.9.082.5  
EDN: DUXITS

PACS: 52.70.Kz, 52.80.-s

## Исследование эмиссионного спектра молекулярного азота в разряде с жидким электролитным анодом

А. В. Чистолинов, Р. В. Якушин, А. А. Лубин, А. В. Угрюмов

*Измерено распределение интенсивности свечения второй положительной системы азота по высоте в разряде с жидким электролитным анодом при атмосферном давлении в воздухе. Показано, что интенсивность свечения второй положительной системы азота имеет абсолютный максимум вблизи металлического электрода, превосходящий по интегральной интенсивности свечения интегральную интенсивность свечения всего остального разряда. Показано, что вращательные температуры молекулярного азота в разряде с жидким анодом вблизи поверхности раствора и вблизи металлического электрода в диапазоне токов 20–40 мА монотонно растут с ростом разрядного тока, причём вблизи металлического электрода они в 1,2–1,6 раз выше, чем вблизи поверхности раствора.*

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

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-6-17-23

### Введение

Первые исследования взаимодействия плазмы газового разряда с водными растворами были проведены ещё в конце XIX века А. Губкиным [1]. Однако, именно в последние

годы наметился значительный рост интереса к исследованиям взаимодействия электроразрядной плазмы с поверхностью водных растворов [2, 3], который связан, прежде всего, с перспективами практического использования таких разрядных систем [4–6]. Тем не менее, несмотря на большой исследовательский интерес, эта область электроразрядной плазмы всё ещё содержит множество нерешённых вопросов, которые обусловлены большой сложностью и разнообразием плазменно-растворных систем [7–10].

Наиболее эффективным способом организации взаимодействия электроразрядной плазмы с водным раствором является разряд, в котором раствор играет роль одного из электродов. Разряд с жидким анодом, как и разряд с жидким катодом при атмосферном давлении в воздухе в широком диапазоне разрядных токов представляет собой тлеющий разряд атмосферного давления [3]. Если раствор играет роль анода в разряде, то поверхность раствора подвергается бомбардировке преимущественно электронами плазмы, если роль катода, то высокоэнергетичными положительными ионами, разогнанными в катодном слое.

---

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.Лубин Антон Александрович<sup>1,2</sup>, стажёр-исследователь, аспирант.Угрюмов Александр Валерьевич<sup>3</sup>, старший вице-президент по научно-технической деятельности, к.т.н.<sup>1</sup> Объединённый 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.

<sup>3</sup> АО «ТВЭЛ».

Россия, 119017, Москва, ул. Большая Ордынка, 24.

---

Статья поступила в редакцию 19.07.2024

После доработки 10.09.2024

Принята к публикации 8.10.2024

Шифр научной специальности: 1.3.9

---

© Чистолинов А. В., Якушин Р. В., Лубин А. А., Угрюмов А. В., 2024

Как и в разряде с жидким катодом, в эмиссионном спектре разряда с жидким анодом в воздухе наблюдаются полосы второй положительной системы молекулярного азота  $N_2(2+)$ , ОН радикала, атомарного водорода  $H I$  ( $H_\alpha$  и  $H_\beta$ ) и атомарного кислорода  $O I$ , а также более слабые полосы  $NO$ ,  $N_2^+$ ,  $N_2(1+)$  [7–10]. Эмиссионные полосы второй положительной системы молекулярного азота играют особую роль, так как позволяют определить вращательную и колебательную температуры молекулярного азота, которые очень важны для диагностики плазмы разряда [11].

Разряд с жидким анодом имеет относительно небольшую протяжённость, обычно всего несколько миллиметров. Однако, даже в тех работах, где спектральные исследования проводились с пространственным разрешением, распределение интенсивности свечения компонент плазмы по высоте разряда строилось обычно с разрешением всего в несколько точек на миллиметр [11–13]. Это затрудняет анализ процессов, происходящих в разряде с жидким анодом. В особенности высокое пространственное разрешение имеет большое значение вблизи поверхности раствора и вблизи металлического электрода, где параметры плазмы быстро меняются вдоль оси разряда.

Таким образом, задача измерения распределения свечения молекулярного азота в разряде с жидким анодом с высоким пространственным разрешением в настоящее время является актуальной. Другая задача, которая в настоящее время является актуальной – это исследование зависимости вращательных и колебательных температур молекулярного азота в разных зонах разряда с жидким анодом от состава раствора при разных разрядных токах. Такое комплексное исследование эмиссионного спектра молекулярного азота проводилось ранее только для разряда с жидким катодом [14, 15]. В настоящей работе мы постарались восполнить этот пробел.

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

В ходе выполнения настоящего исследования была использована экспериментальная установка, описанная в [16], в которой разряд

создавался между стержневым металлическим электродом и поверхностью раствора при атмосферном давлении в воздухе. Расстояние между электродом и поверхностью раствора во всех экспериментах составляло 2 мм. Электрод был выполнен в виде вольфрамового стержня диаметром 2 мм.

На этот электрод подавалось постоянное отрицательное напряжение от стабилизированного источника питания. Второй, заземлённый электрод, сделанный из нержавеющей стали, был погружен в раствор, находившийся в проточной разрядной ячейке объёмом 100 мл.

Скорость циркуляции раствора через разрядную ячейку составляла 330 мл/мин. Приготовление свежего раствора осуществлялось непосредственно перед поступлением в разрядную ячейку путём смешения деионизированной воды, поступающей из системы водоподготовки, с растворами химически чистых реагентов, подаваемых перистальтическими насосами. Удельная электропроводность, водородный показатель (рН) раствора и его температура измерялись на входе в разрядную ячейку. Температура раствора во всех экспериментах составляла  $14 \pm 2$  °С.

Для получения спектров в выбранных зонах разряда, как в [14, 15], использовался трехканальный спектрометр Avaspec 2048 с диапазоном длин волн 200–1100 нм со спектральным разрешением 0,15 нм. Изображение разряда проецировалось кварцевой линзой на плоскость в масштабе 1:1. В этой плоскости в исследуемой зоне помещалась входное отверстие световода спектрометра, диаметр которого составлял 100 мкм. Съёмка спектров производилась на оси разряда вблизи кончика металлического электрода и вблизи поверхности раствора в области локального максимума свечения.

Для получения пространственного распределения интенсивности свечения вдоль выделенного направления в заданном спектральном диапазоне, как в [14, 15] использовался спектрограф высокого разрешения MS-5204i с диапазоном длин волн 190–1500 нм со спектральным разрешением 0,03 нм с ПЗС-матрицей Andor 1024×255 pix на выходе. Изображение разряда проецировалось кварцевой линзой на плоскость, в которой распола-

галась входная щель спектрографа в масштабе 1:1. Спектрограф MS-5204i с ПЗС-матрицей Andor позволял снимать одновременно линейку из 255 спектров, что обеспечило пространственное разрешение 45 точек на миллиметр.

Определение колебательной и вращательной температур по эмиссионному спектру второй положительной системы молекулярного азота проводилось для диапазона длин волн 340–360 нм. Колебательная и вращательная температура молекулярного азота определялись путём сравнения его спектра излучения с модельным спектром, построенным в программе Spesair [17]. Относительная погрешность определения для вращательных и колебательных температур составляла  $\pm 10\%$ .

Измерение интенсивности свечения второй положительной системы молекулярного азота осуществлялось на длине волны 357 нм, соответствующей спектральному максимуму излучения в исследуемом диапазоне длин волн (340–360 нм).

В ходе выполнения работы исследовалась зависимость эмиссионных спектров второй положительной системы молекулярного азота от электрохимических свойств жидкого анода, которые определяются его составом. Основные электрохимические показатели раствора - это его удельная электропроводность и водородный показатель (рН). В настоящем исследовании использовались следующие растворы:

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

Первые два исследуемых раствора совпадали по удельной электропроводности, но отличались по уровню рН, а последние два совпадали по уровню рН, но имели различную удельную электропроводность.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

В разряде с жидким анодом для трёх растворов электролитов было проведено исследование распределения интенсивности свечения второй положительной системы азо-

та по высоте. Измерения проводились на оси разряда при разрядном токе 40 мА. Для всех исследованных растворов распределения оказались практически идентичными. Распределение имело три максимума, которые можно привести в соответствие с определёнными зонами тлеющего разряда. Первый максимум – вблизи поверхности раствора, соответствующий области анодного свечения. Второй максимум – вблизи электрода, соответствующий области отрицательного свечения. Третий максимум – непосредственно на электроде, соответствующий области катодного свечения (рис. 1).

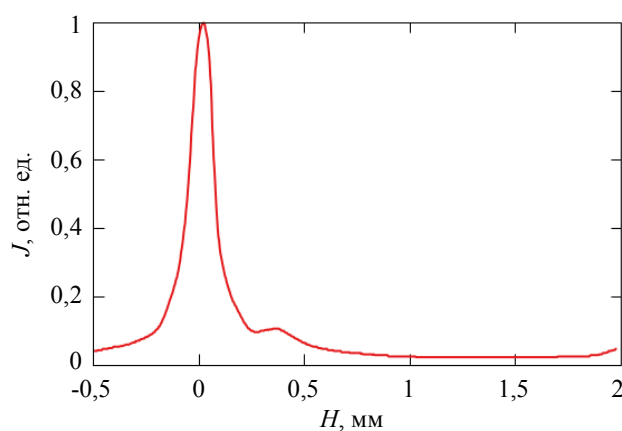


Рис. 1. Распределение интенсивности  $J$  свечения второй положительной системы азота в разряде с раствором № 2 при токе 40 мА по высоте  $H$ , отсчитываемой от кончика катода в сторону поверхности раствора

Расстояние между максимумом, соответствующим области отрицательного свечения, и максимумом, соответствующим области катодного свечения, находящемуся на металлическом электроде, составило 350 мкм. Интенсивность максимума на металлическом электроде в 9 раз превышала интенсивность максимума, соответствующего области отрицательного свечения, и в 21 раз превышала интенсивность максимума вблизи поверхности раствора. При этом, если проинтегрировать интенсивность свечения второй положительной системы азота по высоте, то интегральная интенсивность свечения максимума вблизи металлического электрода, как видно из рис. 1, заметно превышает интегральную интенсивность свечения всей остальной части разряда. Как показали дальнейшие исследования, интенсивность излуче-

ния второй положительной системы азота в разряде с жидким анодом в максимумах, соответствующих поверхности раствора и металлическому электроду мало зависит от состава раствора и незначительно изменяется (в пределах 20 %) с изменением разрядного тока в исследованном диапазоне токов: 20–40 мА.

Для разряда с жидким анодом было проведено исследование зависимости колебательной и вращательной температур молекулярного азота от тока разряда вблизи поверхности жидкого электрода. Исследование проводилось для трёх растворов при трёх разрядных токах: 20, 30, и 40 мА. Для растворов с электропроводностью 300 мкСм/см при  $\text{pH} = 3,1$  и  $\text{pH} = 4,7$  в разряде с жидким анодом вблизи поверхности раствора с ростом разрядного тока от 20 до 40 мА вращательная температура возрастает от 1300 К до 1750 К.

Колебательная температура находится в диапазоне 3450–3600 К. Изменение колебательной температуры с ростом разрядного тока находится в пределах погрешности определения. Для раствора с электропроводностью 1100 мкСм/см при  $\text{pH} = 4,7$  в разряде с жидким анодом вблизи поверхности раствора с ростом разрядного тока от 20 до 40 мА вращательная температура возрастает от 1450 К до 2050 К. Колебательная температура находится в диапазоне 3800–3900 К. Таким образом, можно сделать заключение, что с ростом разрядного тока вращательная температура молекулярного азота вблизи поверхности раствора в разряде с жидким анодом монотонно возрастает. Колебательная температура молекулярного азота при этом практически не изменяется. С ростом электропроводности раствора вблизи поверхности раствора в разряде с жидким анодом происходит рост и вращательной, и колебательной температуры молекулярного азота. При этом, влияние роста электропроводности раствора на рост вращательной температуры молекулярного азота оказывается более слабым, чем влияние роста разрядного тока. Изменение уровня  $\text{pH}$  раствора при неизменной электропроводности раствора не оказывает никакого влияния на колебательную и вращательную температуры азота в разряде с жидким анодом.

Для разряда с жидким анодом было также проведено исследование зависимости ко-

лебательной и вращательной температур молекулярного азота от тока разряда вблизи металлического электрода. Исследование проводилось для тех же растворов и при тех же разрядных токах, что и исследование температуры молекулярного азота вблизи поверхности раствора. Вращательная и колебательная температуры молекулярного азота вблизи металлического электрода в разряде с жидким анодом, оказались независимыми от состава и электрохимических свойств раствора с точностью до погрешности определения. Вращательная температура молекулярного азота в разряде с жидким анодом вблизи металлического электрода монотонно растёт с ростом разрядного тока от 2100 К при 20 мА до 2500 К при 40 мА (рис. 2). Колебательная температура вблизи металлического электрода в разряде с жидким анодом для разных токов отличается в пределах погрешности определения и составляет от 4000 до 4300 К.

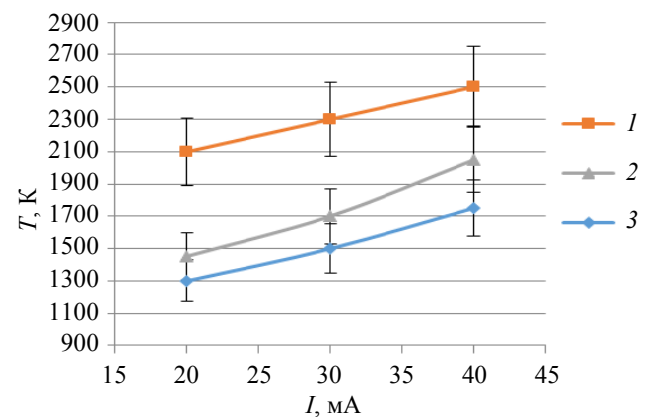


Рис. 2. Зависимость вращательной температуры  $T$  молекулярного азота от разрядного тока  $I$ : 1 – вблизи катода для растворов № 1, 2, 3; 2 – вблизи поверхности раствора № 3; 3 – вблизи поверхности растворов № 1, 2

Сопоставление вращательных температур, рассчитанных по молекулярному азоту, вблизи металлического электрода в разряде с жидким анодом со значениями вращательной температуры, полученными вблизи поверхности раствора, показывает, что более высокие вращательные температуры (2100–2500 К) в разряде с жидким анодом наблюдаются вблизи металлического электрода, в максимуме интенсивности излучения второй положительной системы азота (рис. 2). Поскольку максимум излучения второй положительной

системы азота вблизи металлического электрода в разряде с жидким анодом более чем на порядок превосходит по интенсивности максимум вблизи поверхности раствора, а по интегральной интенсивности свечения заметно превосходит интегральную интенсивность свечения остальной части разряда, то при интегральной съёмке спектра разряда (без пространственного разрешения) максимум вблизи электрода будет давать основной вклад в спектр разряда.

Полученные значения вращательных температур молекулярного азота вблизи поверхности раствора и вблизи металлического электрода в разряде с жидким анодом можно сопоставить данными из работы [11], в которой исследовался разряд с жидким электролитным анодом при электропроводности раствора 510 мкСм/см и разрядном промежутке 5 мм в диапазоне разрядных токов 5–30 мА. В работе [11] для разряда с жидким анодом вблизи поверхности раствора для тока 20 мА получено значение 1500 К, для 30 мА – 1600 К, а вблизи металлического электрода для 20 мА – 2100 К, для 30 мА – 2200 К. Для сравнения, в нашей работе вблизи поверхности раствора для тока 20 мА получено значение 1300 К при удельной электропроводности раствора 300 мкСм/см и 1450 К при 1100 мкСм/см, для 30 мА – 1500 К при 300 мкСм/см и 1700 К при 1100 мкСм/см, а вблизи металлического электрода для 20 мА – 2100 К, для 30 мА – 2300 К.

Учитывая, что погрешности определения температур в обеих работах около 10 %, можно говорить об очень хорошем совпадении результатов этих работ. Кроме того, такое хорошее совпадение результатов при величине разрядных промежутков, отличающихся в 2,5 раза, указывает на то, что в широком диапазоне величин разрядных промежутков (по крайней мере от 2 до 5 мм) вращательные температуры молекулярного азота вблизи поверхности раствора и вблизи металлического электрода в разряде с жидким анодом не зависят от расстояния между ними.

Полученные результаты для разряда с жидким анодом интересно также сравнить с полученными при тех же условиях результатами работ [14, 15] для разряда с жидким катодом. В этих работах разряд с жидким катодом исследовался в диапазоне разрядных токов 20–100 мА для растворов такого же со-

става, как и в настоящей работе, при таком же разрядном промежутке. В [14, 15] было показано, что в разряде с жидким катодом вблизи металлического электрода наблюдается рост вращательной температуры молекулярного азота с ростом разрядного тока, как и в разряде с жидким анодом. Однако, в разряде с жидким катодом вблизи поверхности раствора вращательная температура азота не зависит ни от разрядного тока, ни от состава раствора, в отличие от разряда с жидким анодом, где эти зависимости имеют место.

И в разряде с жидким катодом, и в разряде с жидким анодом наиболее интенсивный максимум излучения второй положительной системы азота наблюдается на металлическом электроде, максимум излучения вблизи поверхности раствора в обоих случаях примерно на порядок менее интенсивный (оба распределения построены при разрядном токе 40 мА). В разряде с жидким катодом более низкая вращательная температура молекулярного азота (1150 К при 40 мА), наблюдается вблизи металлического анода. В разряде с жидким анодом, более низкая вращательная температура – вблизи поверхности жидкого анода (1750 К при 40 мА для раствора с удельной электропроводностью 300 мкСм/см). В разряде с жидким катодом более высокая вращательная температура молекулярного азота (2400 К при 40 мА) – вблизи поверхности жидкого катода. В разряде с жидким анодом более высокая вращательная температура молекулярного азота (2500 К при 40 мА) – вблизи металлического катода.

## Заключение

Измерено распределение интенсивности свечения второй положительной системы азота в разряде с жидким электролитным анодом по высоте с пространственным разрешением 45 точек на мм при разрядном промежутке 2 мм и разрядном токе 40 мА. Показано, что это распределение имеет максимум вблизи металлического электрода, превосходящий по интегральной интенсивности свечения интегральную интенсивность свечения всего остального разряда. Величина этого максимума в 21 раз превосходит величину максимума вблизи поверхности раствора и в 42 раза пре-

восходит величину интенсивности свечения в центральной части разрядного канала.

Определены колебательные и вращательные температуры молекулярного азота в разряде с жидким анодом вблизи поверхности раствора и вблизи металлического электрода для разрядных токов в диапазоне 20–40 мА. Показано, что вращательные температуры молекулярного азота в разряде с жидким анодом вблизи поверхности раствора и вблизи металлического электрода растут с ростом разрядного тока, при этом, при одном и том же разрядном токе вблизи металлического электрода (катода) они в 1,2–1,6 раз выше, чем вблизи поверхности раствора.

Сравнение разряда с жидким анодом и разряда с жидким катодом показывает, что абсолютный максимум интенсивности излучения второй положительной системы азота в обоих случаях находится вблизи металлического электрода. Тогда как более высокая вращательная температура молекулярного азота в обоих случаях наблюдается вблизи катода.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-30062) и средств индустриального партнера АО «ТВЭЛ» (департамент по научно-технической деятельности неядерных производств).*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Gubkin A. / J. Ann. Phys. Chem. 1887. Vol. 32. P. 114.
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. / 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. 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. Bruggeman P., Leys C. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. Vol. 42. № 5. P. 1.

8. 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.

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

10. 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.

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

12. Bruggeman P., Ribezl E., Maslani A., Degroote J., Malesevic A., Rego R., Vierrendeels J., Leys C. / Plasma Sources Sci. Technol. 2008. Vol. 17. № 2. P. 025012.

13. Mezei P., Cserfalvi T., Csillag L. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. Vol. 38. P. 2804.

14. Чистолинов А. В., Якушин П. В., Перфильева А. В. / Прикладная физика. 2022. № 1. С. 12.

15. Чистолинов А. В., Якушин П. В., Лубин А. А., Перфильева А. В. / Прикладная физика. 2024. № 4. С. 5.

16. Чистолинов А. В., Тюфтяев А. С., Гаджиев М. Х. / Прикладная физика. 2021. № 5. С. 5.

17. Laux C. O. 2002. www.specair-radiation.net

PACS: 52.70.Kz, 52.80.-s

## Investigation of the emission spectrum of molecular nitrogen in a discharge with a liquid electrolyte anode

A. V. Chistolinov<sup>1</sup>, R. V. Yakushin<sup>2</sup>, A. A. Lubin<sup>1,2</sup> and A. V. Ugryumov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences  
Bld. 2, 13 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia

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

<sup>3</sup>TVEL JSC

24, Bolshaya Ordynka st., Moscow, 119017, Russia

Received 19.07.2024; revised 10.09.2024; accepted 8.10.2024

***The distribution of the luminescence intensity of the second positive nitrogen system in height in a discharge with a liquid electrolyte anode at atmospheric pressure in air was measured. It was shown that the luminescence intensity of the second positive nitrogen system has an absolute maximum near the metal electrode, exceeding the integral luminescence intensity of the integral luminescence intensity of the rest of the discharge. It was shown that the rotational temperatures of molecular nitrogen in a discharge with a liquid anode near the surface of the solution and near the metal electrode in the current range of 20–40 mA monotonously increase with increasing discharge current, and near the metal electrode they are 1.2–1.6 times higher than near the surface of the solution.***

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

## REFERENCES

1. Gubkin A., J. Ann. Phys. Chem. **32**, 114 (1887).
2. Kutepov A. M., Zakharov A. G. and Maksimov A. I. Vacuum-plasma and plasma-solution modification of polymeric materials, Moscow, Nauka, 2004 [in Russian].
3. Maksimov A. I. Encyclopedia of low-temperature plasma. **11** chapter 5 / Ed. Lebedev Yu. A., Plate N. A. and Fortov V. E., Moscow, Janus-K, 2006 [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. Bruggeman P. and Leys C., J. Phys. D: Appl. Phys. **42** (5), 1 (2009).
8. 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., Krema 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. and Zvereva G., Plasma Sources Sci. Technol. **25**, 053002 (2016).
9. Vanraes P. and Bogaerts A., Applied Physics Reviews **5**, 031103 (2018).
10. 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).
11. Bruggeman P., Liu J., Degroote J., Kong M. G., Vierendeels J. and Leys C., J. Phys. D: Appl. Phys. **41**, 215201 (2008).
12. 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).
13. Mezei P., Cserfalvi T. and Csillag L., J. Phys. D: Appl. Phys. **38**, 2804 (2005).
14. Chistolinov A. V., Yakushin R. V. and Perfilieva A. V., Applied Physics, № 1, 12 (2022) [in Russian].
15. Chistolinov A. V., Yakushin R. V., Lubin A. A. and Perfilieva A. V., Applied Physics, № 4, 5 (2024) [in Russian].
16. Chistolinov A. V., Tyuftyaev A. S. and Gadzhiev M. Kh., Applied Physics, № 5, 5 (2021) [in Russian].
17. Laux C. O. (2002). [www.specair-radiation.net](http://www.specair-radiation.net)