

УДК 533.9.082.5  
EDN: TMNBUN

PACS: 52.70.Kz, 52.80.-s

## Исследование эмиссионного спектра второй положительной системы молекулярного азота в разряде с жидким электролитным катодом

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

*Измерено распределение интенсивности свечения второй положительной системы азота по высоте в разряде с жидким электролитным катодом при атмосферном давлении в воздухе. Показано, что интенсивность свечения второй положительной системы азота имеет абсолютный максимум вблизи металлического электрода, сопоставимый по интегральной интенсивности свечения с интегральной интенсивностью свечения всего остального разряда. Показано, что интенсивность свечения вблизи металлического электрода зависит от состава раствора при разрядном токе более 60 мА. При этом, вблизи металлического электрода вращательная и колебательная температуры, определённые по второй положительной системе азота, не зависят от состава раствора. Вращательная температура монотонно растёт с ростом разрядного тока, а колебательная остаётся практически постоянной.*

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

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-4-5-13

### Введение

Одним из направлений исследования электро-разрядной плазмы являются разряды, в которых один или оба электрода находятся в

жидком состоянии. Очевидным преимуществом такого типа разрядов является отсутствие эрозии жидкого электрода, что очень важно для технологических применений электро-разрядной плазмы.

Особым случаем такого типа разряда является разряд, в котором в качестве жидкого электрода используется водный раствор электролита. В таких разрядах большой интерес представляют не только процессы, происходящие в плазме разряда, но и процессы в водном растворе, инициированные взаимодействием с плазмой. Нарботка в растворе, в результате взаимодействия с плазмой, различных активных частиц, прежде всего свободных радикалов, делает разряд такого типа интересным для различных плазмохимических приложений. Это могут быть приложения, связанные с окислением в водных растворах различных органических соединений, приложения, связанные со стерилизацией водных

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.

Перфильева Анна Владимировна<sup>2</sup>, 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 6.02.2024

После доработки 27.05.2024

Принята к публикации 3.06.2024

Шифр научной специальности: 1.3.9

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

растворов или каких-то материалов в них, модифицирование поверхности в растворах, в том числе поверхности полимерных материалов, синтез наночастиц в растворах и многие другие приложения [1–12]. Не удивительно, поэтому, что исследования взаимодействия электроразрядной плазмы с поверхностью растворов в настоящее время переживают период бурного роста и количество работ, посвящённых этой тематике, постоянно растёт [13–27].

Разряды, в которых один из электродов является раствором электролита можно подразделить на разряды переменного тока и разряды постоянного тока, которые в свою очередь подразделяются на разряды с жидким анодом и разряды с жидким катодом. В случае разряда с жидким катодом образование активных частиц в растворе происходит наиболее интенсивно, так как поверхность раствора в разряде с жидким катодом подвергается бомбардировке положительными ионами, разогнанными в катодном слое.

При атмосферном давлении в воздухе толщина катодного слоя очень мала, а величина катодного падения потенциала составляет от 400 до 800 В, в зависимости от параметров разряда [1]. Под действием ионной бомбардировки в разряде с жидким катодом в газовую фазу переносятся не только летучие, но и нелетучие компоненты раствора [5–7, 18]. Это позволяет использовать раствор электролита в разряде с жидким электролитным катодом, как поставщик различных элементов и химических соединений в электроразрядную плазму. Таким образом, разряд с жидким электролитным катодом имеет большие перспективы для создания на его основе различных плазмохимических технологий.

Разряд с жидким электролитным катодом при атмосферном давлении в воздухе в широком диапазоне разрядных токов представляет собой тлеющий разряд атмосферного давления [2]. Но, из-за интенсивного переноса компонентов электролита в газовую фазу, разряд с жидким катодом гораздо сложнее и гораздо хуже изучен, чем тлеющий разряд атмосферного давления с твёрдыми электродами. Если разряд с жидким катодом происходит в воздухе, то в его эмиссионном спектре всегда 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 наблюдаются более слабые полосы  $NO$ ,  $N_2^+$ ,  $N_2(1+)$  [1, 28]. Полосы второй положительной системы молекулярного азота, наряду с полосами излучения ОН радикала, имеют большое значение для диагностики плазмы разряда, так как позволяют определить вращательную и колебательную температуры молекулярных компонент [28].

Свечение различных компонент плазмы разряда с жидким электролитным катодом очень неоднородно по высоте. Но, поскольку разряд с жидким катодом имеет относительно небольшую протяжённость, обычно всего несколько миллиметров, большинство спектральных исследований разряда с жидким катодом, к сожалению, проводилось без пространственного разрешения. В тех же случаях, когда спектральные исследования проводились с пространственным разрешением, распределение интенсивности свечения компонент плазмы по высоте разряда строилось с разрешением всего в несколько точек на миллиметр [28–31]. Это сильно затрудняет воссоздание картины процессов, происходящих в разряде с жидким катодом. Особенно высокое пространственное разрешение важно вблизи поверхности раствора и металлического электрода, где параметры плазмы и яркость свечения её компонент имеют очень большую пространственную неоднородность. Кроме того, зависимость интенсивности излучения второй положительной системы молекулярного азота вблизи металлического электрода в разряде с жидким катодом от состава раствора практически не изучена. В настоящей работе мы постарались восполнить эти пробелы, существующие в современных исследованиях разряда с жидким электролитным катодом.

### Экспериментальная установка и методика измерений

В ходе выполнения настоящего исследования была использована экспериментальная установка, описанная в [32], в которой разряд постоянного тока создавался между стержневым металлическим электродом и поверх-

ностью раствора при атмосферном давлении в воздухе. Расстояние между электродом и поверхностью раствора во всех экспериментах составляло 2 мм. В качестве электрода использовался вольфрамовый стержень диаметром 2 мм с радиусом кончика электрода 1 мм.

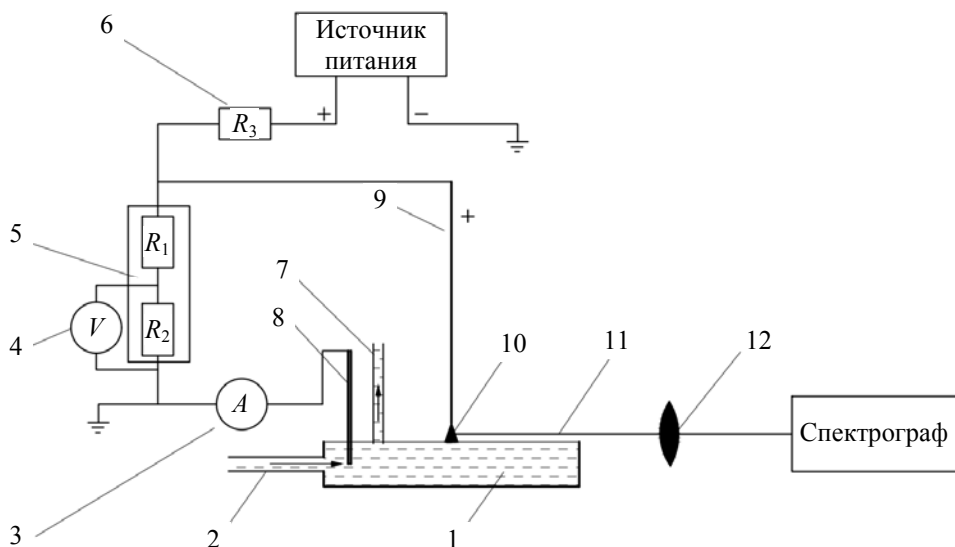
Разряд осуществлялся в проточной разрядной ячейке объемом 100 мл, глубина разрядной ячейки (глубина раствора) составляла 14 мм. Циркуляция раствора осуществлялась со скоростью 330 мл/мин. В разрядную ячейку всегда поступал свежий раствор. Для его приготовления использовалась деионизированная вода и химически чистые реагенты. 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 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 с помощью микрометрических винтов осуществлялось перемещение входного отверстия световода спектрометра. Диаметр входного отверстия

световода спектрометра составлял 100 мкм. Съёмка спектров производилась на оси разряда вблизи кончика металлического электрода в области локального максимума свечения.

Для получения пространственного распределения интенсивности свечения вдоль выделенного направления в заданном спектральном диапазоне 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 располагалась входная щель спектрографа в масштабе 1:1 (рис. 1). Спектрограф MS-5204i с ПЗС-матрицей Andor позволял снимать одновременно линейку из 255 спектров, что обеспечило пространственное разрешение 50 точек на миллиметр.

Циркуляция раствора в разрядной ячейке была организована так, что поступление раствора в разрядную ячейку осуществлялось с одной стороны разрядной ячейки, а сток раствора происходил с противоположной стороны ячейки, чтобы раствор в зоне разряда постоянно обновлялся (на рис. 1 подача и сток раствора изображены схематично). Уровень поверхности раствора находился при этом на уровне края разрядной ячейки.



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки для исследования вертикального распределения интенсивности свечения компонентов плазмы: 1 – проточная разрядная ячейка; 2 – трубка для подачи раствора в разрядную ячейку; 3 – амперметр; 4 – вольтметр; 5 – делитель напряжения; 6 – балластное сопротивление; 7 – трубка для откачивания раствора; 8 – катод; 9 – анод; 10 – разряд; 11 – излучение разряда; 12 – кварцевая линза

Определение колебательной и вращательной температур по эмиссионному спектру второй положительной системы молекулярного азота проводилось для диапазона длин волн 340–360 нм [33]. Колебательная и вращательная температура молекулярного азота определялись путём сравнения его спектра излучения с модельным спектром, построенным в программе Spesair [34].

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 плазмы разряда от электрохимических свойств жидкого электрода, которые определялись его составом. Основными электрохимическими показателями раствора являются его удельная электропроводность и водородный показатель (рН). Для исследования зависимости эмиссионных спектров плазмы разряда с жидким электродом от электропроводности и рН жидкого электрода использовались такие же растворы, как в [33].

В качестве первого раствора был взят раствор нитрата натрия в деионизированной воде с удельной электропроводностью 300 мкСм/см и рН = 4,7, что примерно соответствует параметрам водопроводной воды хорошего качества.

В качестве второго раствора в наших исследованиях был взят раствор азотной кислоты в деионизированной воде с такой же

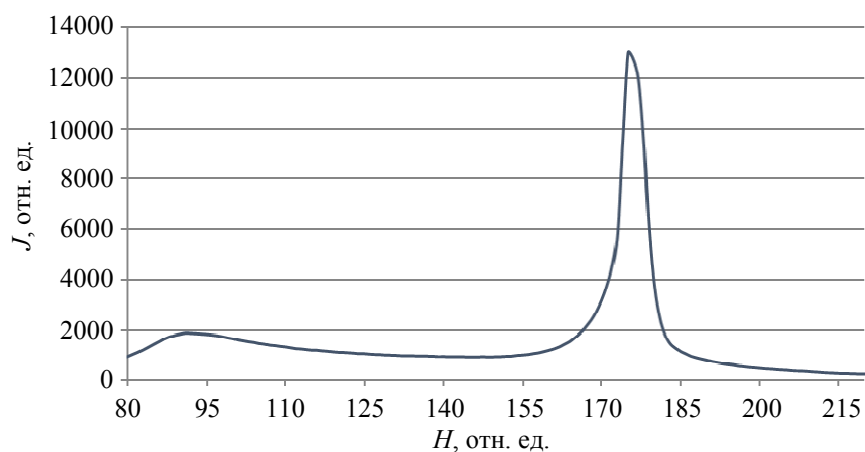
удельной электропроводностью, как и первый раствор: 300 мкСм/см и рН = 3,1.

Третий раствор имел такое же значение рН, как и первый раствор, при более высокой электропроводности. В качестве третьего раствора в наших исследованиях был выбран раствор нитрата натрия с концентрацией в 4 раза большей, чем для первого раствора. Электропроводность третьего раствора составила 1100 мкСм/см при рН = 4,7.

Исследование этих трёх растворов позволило выявить влияние на эмиссионные спектры плазмы разряда с жидким электродом изменения рН и проводимости раствора по отдельности.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

В разряде с жидким катодом для трёх растворов электролитов было проведено исследование распределение интенсивности свечения второй положительной системы азота по высоте. Измерения проводились при токе 40 мА. Для всех исследованных растворов распределения оказались практически идентичными. Распределение имело два максимума, которые можно привести в соответствие с определёнными зонами тлеющего разряда. Первый максимум – вблизи поверхности раствора, соответствующий области отрицательного свечения. Второй максимум – непосредственно на металлическом электроде, соответствующий области анодного свечения (рис. 2).



*Рис. 2. Распределение интенсивности свечения второй положительной системы азота  $J$  по высоте  $H$  на оси разряда в разряде с жидким катодом. Точка 80 по оси абсцисс соответствует поверхности раствора, точка 175 – кончику металлического электрода (анод). Масштаб по  $H$  – 21 мкм/отн. ед. Ток разряда 40 мА. Электропроводность раствора 300 мкСм/см, рН = 4,7*

Интенсивность максимума на металлическом электроде в семь 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 рисунка 2, будет сопоставима с интегральной интенсивностью свечения всей остальной области разряда.

Также по второй положительной системе молекулярного азота были определены вращательная и колебательная температуры вблизи металлического электрода в разряде с жидким катодом. Было установлено, что вращательная и колебательная температуры вблизи металлического электрода в диапазоне токов от 40 до 100 мА не зависят от состава раствора с точностью до погрешности определения. Было показано, что вращательная температура вблизи металлического электрода с ростом тока разряда от 40 до 100 мА монотонно возрастает от температуры 1150 до температуры 1550 К (рис. 3). Колебательная температура вблизи металлического анода при этом для всех растворов при всех разрядных токах остаётся равной 3800 К с точностью до погрешности определения. Относительная погрешность определения для обеих температур составляет  $\pm 10\%$ .

Полученные нами значения температур при разрядном токе 40 мА, с точностью до погрешностей определения согласуются со значениями вращательной и колебательной температуры молекулярного азота вблизи метал-

лического электрода из работы [28], в которой исследовался разряд с жидким электролитным катодом при проводимости раствора 510 мкСм/см, разрядном промежутке 5 мм и токе разряда 30,9 мА (максимальный, исследованный в этой работе ток).

Также было проведено исследование интенсивности свечения второй положительной системы молекулярного азота вблизи металлического электрода при разных разрядных токах и разных электрохимических свойствах раствора электролита. Измерения проводились на длине волны 357 нм вблизи локального максимума излучения второй положительной системы молекулярного азота. Было установлено, что интенсивность излучения вблизи металлического электрода для всех исследованных растворов растёт с ростом разрядного тока от 20 до 80 мА. Интенсивность излучения для растворов с электропроводностью 300 мкСм/см возрастает при этом в 5 раз, а для раствора с электропроводностью 1100 мкСм/см в 7,6 раза. При этом, при токах меньших, либо равных 40 мА интенсивность излучения второй положительной системы азота вблизи металлического электрода не зависит от состава раствора.

При росте разрядного тока от 80 до 100 мА рост интенсивности излучения второй положительной системы азота вблизи металлического электрода для раствора с проводимостью 1100 мкСм/см практически прекращается, а для растворов с проводимостью 300 мкСм/см интенсивность излучения начинает падать (рис. 4).

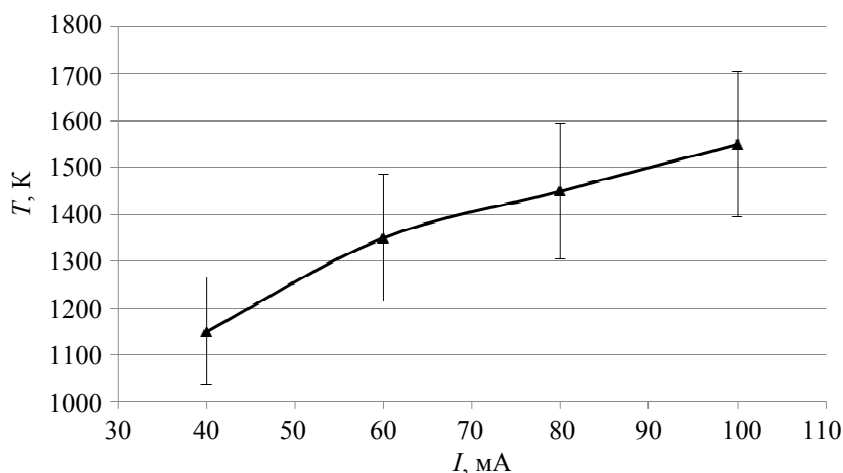
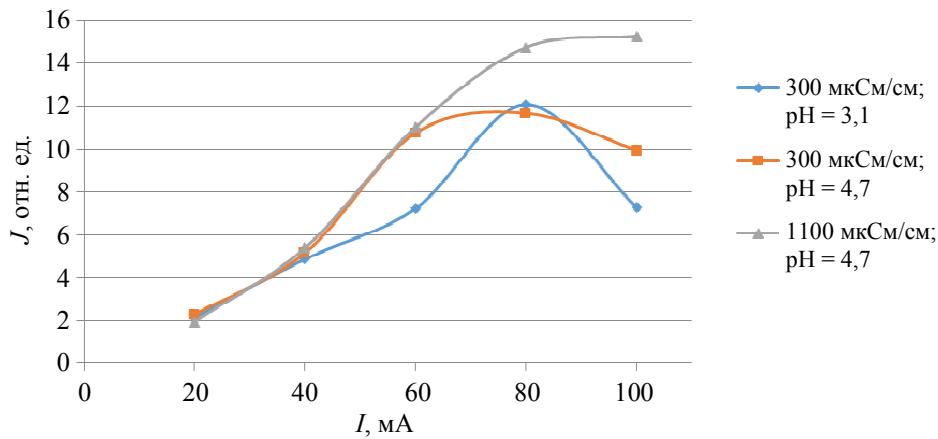


Рис. 3. Зависимость вращательной температуры молекулярного азота  $T$  от разрядного тока  $I$  в разряде с жидким катодом вблизи металлического анода



**Рис. 4.** Зависимость интенсивности свечения  $J$  второй положительной системы азота в разряде с жидким катодом вблизи металлического анода от тока разряда  $I$  для растворов с разными электрофизическими свойствами

Столь сложное поведение интенсивности свечения молекулярного азота вблизи металлического электрода для разных растворов требует дальнейшего исследования. Вполне вероятно, что оно связано с ростом интенсивности переноса компонентов раствора в газовую фазу с ростом разрядного тока в разряде с жидким катодом. На влияние переноса компонентов раствора на интенсивность излучения молекулярного азота вблизи металлического электрода указывает также отсутствие различий интенсивности свечения для разных растворов до достижения определённого критического тока разряда. Можно предположить, что для заметного изменения параметров плазмы разряда вблизи металлического электрода необходимо достичь некоторой критической интенсивности переноса компонентов раствора в газовую фазу, которая в свою очередь достигается при определённом разрядном токе, зависящем от состава раствора.

Полученные результаты интересно сравнить с результатами, работы [33], там было показано, что вращательная и колебательная температуры вблизи поверхности раствора равны соответственно 2400 К и 3800 К и не зависят от тока разряда, состава и электрохимических свойств исследованных растворов. При этом было показано, что интенсивность свечения второй положительной системы молекулярного азота вблизи поверхности раствора для всех растворов падает с ростом разрядного тока.

Сравнивая температуры вблизи электрода и вблизи поверхности раствора в разряде с жидким катодом можно заключить, что:

1. Эти температуры не зависят от состава и электрохимических свойств раствора в исследованном диапазоне электропроводности и pH.

2. Колебательные температуры вблизи электрода и вблизи поверхности не отличаются в пределах точности определения и равны в обоих случаях 3800 К.

3. Вращательные температуры сильно отличаются, причём температура, соответствующая максимуму интенсивности излучения вблизи поверхности раствора, равна 2400 К, а температура, соответствующая максимуму интенсивности излучения вблизи электрода, равна от 1150 К (при токе 40 мА) до 1550 К (при токе 100 мА).

Поскольку максимум вблизи электрода почти на порядок превосходит по интенсивности максимум вблизи поверхности раствора, а по интегральной интенсивности свечения сопоставим с интегральной интенсивностью свечения остальной части разряда, то при интегральной съёмке спектра разряда (без пространственного разрешения) максимум вблизи электрода будет давать вклад в спектр, сопоставимый со вкладом остальной части разряда. Что может приводить к значительной ошибке в сторону занижения в определении вращательной температуры молекулярного азота в разряде с жидким катодом при недостаточном пространственном разрешении.

## Заключение

Измерено распределение интенсивности свечения второй положительной системы азота в разряде с жидким электролитным катодом по высоте с пространственным разрешением 50 точек на мм при разрядном промежутке 2 мм и разрядном токе 40 мА.

Измеренное распределение интенсивности показывает, что она имеет максимум вблизи металлического электрода, сопоставимый по интегральной интенсивности свечения с интегральной интенсивностью свечения всего остального разряда. Величина этого максимума в 7 раз превосходит величину максимума свечения вблизи поверхности раствора и в 14 раз превосходит величину интенсивности свечения в центральной части разрядного канала.

Измеренная интенсивность свечения второй положительной системы азота в максимуме свечения вблизи металлического электрода в разряде с жидким электролитным катодом при атмосферном давлении в воздухе для растворов разного состава не зависит от состава раствора для разрядных токов 20 и 40 мА. Но, существенно зависит от состава раствора для токов в диапазоне 60–100 мА. Предполагается, что это связано с ростом переноса компонентов раствора под действием разряда с жидким катодом в плазму с ростом разрядного тока.

При этом вращательная и колебательная температуры, измеренные по второй положительной системе молекулярного азота, вблизи металлического электрода в диапазоне токов разряда от 40 до 100 мА не зависят от состава раствора. Вращательная температура вблизи металлического электрода с ростом тока разряда от 40 до 100 мА монотонно возрастает от 1150 до 1550 К. Колебательная температура вблизи металлического электрода для всех разрядных токов и исследованных растворов остаётся постоянной и равной 3800 К.

Сравнение с температурами вблизи поверхности раствора, определёнными по второй положительной системе азота, при тех же условиях (вращательная 2400 К, колебательная 3800 К независимо от состава раствора и тока разряда) показывает, что вращательная температура вблизи металлического электрода значительно, от 1,5 до 2 раз, ниже, чем вблизи

поверхности раствора, а колебательная не отличается в пределах погрешности определения.

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

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кутепов А. М., Захаров А. Г., Максимов А. И. Вакуумно-плазменное и плазменно-растворное модифицирование полимерных материалов. – М.: Наука, 2004.
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., Фортова В. Е. – М.: Янус-К, 2006.
3. Yang Y., Cho Y. I., Fridman A. Plasma Discharge in Liquid: Water Treatment and Applications. – CRC Press, 2012.
4. Malik M. A. / Plasma Chem. Plasma Proc. 2010. Vol. 30. P. 21.
5. Mezei P., Cserfalvi T. / Appl. Spectr. Rev. 2007. Vol. 42. № 6. P. 573.
6. Webb M. R., Andrade F. J., Gamez G., McCrindle R., Hieftje G. M. / J. Anal. At. Spectrom. 2005. Vol. 20. № 11. P. 1218.
7. Bencs L., Laczai N., Mezei P., Cserfalvi T. / Spectrochim. Acta, Part B. 2015. Vol. 107. P. 139.
8. Choi H. S., Shikova T. G., Titov V. A., Rybkin V. V. / J. Coll. Interface Sci. 2006. Vol. 300. № 2. P. 640.
9. Joshi R., Schulze R.-D., Meyer-Plath A., Friedrich J. / Plasma Proc. Polym. 2008. Vol. 5. P. 695.
10. Saito G., Akiyama T. / J. Nanomat. 2015. Vol. 2015. P. 123696.
11. Mariotti D., Sankaran R. M. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. Vol. 43. № 32. P. 323001.
12. Суров О. В., Воронова М. И., Тумов В. А., Захаров А. Г. / Прикладная физика. 2021. № 1. С. 17.
13. Bruggeman P., Leys C. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. Vol. 42. № 5. P. 1.
14. 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.
15. Vanraes P., Bogaerts A. / Applied Physics Reviews. 2018. Vol. 5. P. 031103.
16. 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.

17. Гайсин А. Ф., Сон Э. Е. / ТВТ. 2005. Т. 43. № 1. С. 5.
18. Кузьмичева Л. А., Тумова Ю. В., Максимов А. И., Дыдыкин М. Г. / Прикладная физика. 2007. № 6. С. 111.
19. Максимов А. И., Хлюстова А. В., Хорев М. С. / Прикладная физика. 2008. № 5. С. 40.
20. Тазмеева Р. Н., Тазмеев Б. Х. / Прикладная физика. 2014. № 1. С. 35.
21. Тазмеев Х. К., Тимеркаев Б. А., Тазмеев Г. Х., Сарваров Ф. С., Арсланов И. М. / Прикладная физика. 2015. № 2. С. 58.
22. Хлюстова А. В., Тумов В. А. / Прикладная физика. 2015. № 6. С. 48.
23. Сироткин Н. А., Тумов В. А. / Прикладная физика. 2016. № 6. С. 25.
24. Тумов В. А., Хлюстова А. В., Наумова И. К., Сироткин Н. А., Агафонов А. В. / Прикладная физика. 2019. № 4. С. 35.
25. Chistolinov A. V., Yakushin R. V., Sargsyan M. A., Khromov M. A., Tyufyaev A. S. / Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1394. P. 012006.
26. 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.
27. Chistolinov A. V., Yakushin R. V., Perfilieva A. V., Sargsyan M. A., Gadzhiev M. Kh., Tyufyaev A. S. / Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1698. P. 012020.
28. Bruggeman P., Liu J., Degroote J., Kong M. G., Vierendeels J., Leys Ch. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. Vol. 41. P. 215201.
29. 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.
30. Mezei P., Cserfalvi T., Csillag L. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. Vol. 38. P. 2804.
31. Verreycken T., Schram D. C., Leys C., Bruggeman P. / Plasma Sources Sci. Technol. 2010. Vol. 19. P. 045004.
32. Чистолинов А. В., Тюфтяев А. С., Гаджиев М. Х. / Прикладная физика. 2021. № 5. С. 5.
33. Чистолинов А. В., Якушин Р. В., Перфильева А. В. / Прикладная физика. 2022. № 1. С. 12.
34. Laux C. O. 2002. www.specair-radiation.net

PACS: 52.70.Kz, 52.80.-s

## Investigation of the emission spectrum of the second positive system of molecular nitrogen in a discharge with a liquid electrolyte cathode in air at atmospheric pressure

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

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

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

*Received 6.02.2024; revised 27.05.2024; accepted 3.06.2024*

***The distribution of the emission intensity of the second positive nitrogen system in height was measured in a discharge with a liquid electrolyte cathode at atmospheric pressure in air. It was shown that the emission intensity of the second positive nitrogen system has an absolute maximum near the metal electrode, comparable in integral emission intensity to the integral emission intensity of the rest of the discharge. It was shown that the emission intensity near the metal electrode begins to depend on the solution composition at a discharge current  $\geq 60$  mA. In this case, the rotational and vibrational temperatures determined from the second positive nitrogen system do not depend on the solution composition near the metal electrode. The rotational temperature increases monotonously with the growth of the discharge current, while the vibrational temperature remains constant within the accuracy of determination.***

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



## REFERENCES

1. Kutepov A. M., Zakharov A. G. and Maksimov A. I. Vacuum-plasma and plasma-solution modification of polymeric materials, Moscow, Nauka, 2004 [in Russian].
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. and Fortov V. E., Moscow: Janus-K, 2006 [in Russian].
3. Yang Y., Cho Y. I. and Fridman A., Plasma Discharge in Liquid: Water Treatment and Applications, CRC Press, 2012.
4. Malik M. A., Plasma Chem. Plasma Proc. **30**, 21 (2010).
5. Mezei P. and Cserfalvi T., Appl. Spectr. Rev. **42**, 573 (2007).
6. Webb M. R., Andrade F. J., Gamez G., McCrindle R. and Hieftje G. M., J. Anal. At. Spectrom. **20**, 1218 (2005).
7. Benes L., Laczai N., Mezei P. and Cserfalvi T., Spectrochim. Acta, Part B. **107**, 139 (2015).
8. Choi H. S., Shikova T. G., Titov V. A. and Rybkin V. V., J. Coll. Interface Sci. **300**, 640 (2006).
9. Joshi R., Schulze R.-D., Meyer-Plath A. and Friedrich J., Plasma Proc. Polym. **5**, 695 (2008).
10. Saito G. and Akiyama T., J. Nanomat. **2015**, 123696 (2015).
11. Mariotti D. and Sankaran R. M., J. Phys. D: Appl. Phys. **43**, 323001 (2010).
12. Surov O. V., Voronova M. I., Titov V. A. and Zakharov A. G., Applied Physics, № 1, 17 (2021) [in Russian].
13. Bruggeman P. and Leys C., J. Phys. D: Appl. Phys. **42** (5), 1 (2009).
14. Bruggeman P., Kushner M., Locke B., Gardeniens 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. and Zvereva G., Plasma Sources Sci. Technol. **25**, 053002 (2016).
15. Vanraes P. and Bogaerts A., Applied Physics Reviews **5**, 031103 (2018).
16. 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).
17. Gaisin A. F. and Son E. E., High Temperature **43** (1), 1 (2005).
18. Kuzmicheva L. A., Titova J. V., Maximov A. I. and Dydykin M. G., Applied Physics, № 6, 111 (2007) [in Russian].
19. Maximov A. I., Khlyustova A. V. and Khorev M. S., Applied Physics, № 5, 40 (2008) [in Russian].
20. Tazmeev R. N. and Tazmeev B. Kh., Applied Physics, № 1, 35 (2014) [in Russian].
21. Tazmeev Kh. K., Timerkaev B. A., Tazmeev G. Kh., Sarvarov F. S. and Arslanov I. M., Applied Physics, № 2, 58 (2015) [in Russian].
22. Khlyustova A. V. and Titov V. A., Applied Physics, № 6, 48 (2015) [in Russian].
23. Sirotkin N. A. and Titov V. A., Applied Physics, № 6, 25 (2016) [in Russian].
24. Titov V. A., Khlyustova A. V., Naumova I. K., Sirotkin S. A. and Agafonov A. V., Applied Physics, № 4, 35 (2019) [in Russian].
25. Chistolinov A. V., Yakushin R. V., Sargsyan M. A., Khromov M. A. and Tyuftyaev A. S., Journal of Physics: Conference Series **1394**, 012006 (2019).
26. Chistolinov A. V., Yakushin R. V., Sargsyan M. A., Khromov M. A. and Perfilieva A. V., Journal of Physics: Conference Series **1556**, 012090 (2020).
27. 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).
28. Bruggeman P., Liu J., Degroote J., Kong M. G., Vierendeels J. and Leys C., J. Phys. D: Appl. Phys. **41**, 215201 (2008).
29. Bruggeman P., Ribezl E., Maslani A., Degroote J., Malesevic A., Rego R., Vierrendeels J. and Leys C., Plasma Sources Sci. Technol. **17** (2), 025012 (2008).
30. Mezei P., Cserfalvi T. and Csillag L., J. Phys. D: Appl. Phys. **38** 2804 (2005).
31. Verreycken T., Schram D. C., Leys C. and Bruggeman P., Plasma Sources Sci. Technol. **19**, 045004 (2010).
32. Chistolinov A. V., Tyuftyaev A. S. and Gadzhiev M. Kh., Applied Physics, № 5, 5 (2021) [in Russian].
33. Chistolinov A. V., Yakushin R. V. and Perfilieva A. V., Applied Physics, № 1, 12 (2022) [in Russian].
34. Laux C. O. (2002). [www.specair-radiation.net](http://www.specair-radiation.net)