

## Разряд между струйным жидким и металлическим электродами

© Ал.Ф. Гайсин,<sup>1</sup> Н.Ф. Кашапов,<sup>2</sup> А.И. Купутдинова,<sup>1</sup> Р.А. Мухаметов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ, 420111 Казань, Россия

<sup>2</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет, 420008 Казань, Россия  
e-mail: almaz87@mail.ru

(Поступило в Редакцию 11 сентября 2017 г.)

Представлены результаты экспериментальных исследований низкотемпературной плазмы газового разряда, генерируемого в межэлектродном промежутке, где один электрод — струйный жидкий катод, второй — металлический анод. Представлены результаты исследований электрофизических и спектральных характеристик разряда, определен состав плазмы, даны оценки концентрации и температуры электронов, колебательной и вращательной температур тяжелой компоненты. Описаны формы и типы разряда, особенности газогидродинамических и тепловых процессов, протекающих на границе раздела сред.

DOI: 10.21883/JTF.2018.05.45900.2485

### Введение

Физика и применение электрического разряда в газах, генерируемого между твердыми электродами, достаточно подробно исследованы специалистами из различных научных школ [1,2]. Вместе с тем в последние два десятилетия к данным исследованиям добавилось новое направление в области формирования разряда с жидкими электролитическими электродами. Данный тип разряда генерируется в межэлектродном промежутке токами постоянного или переменного поля, где один или оба электрода являются жидкостью. В качестве жидкости применяются, как правило, растворы солей различной концентрации в технической или дистиллированной воде. Внимание специалистов направлено на исследование типов и форм генерируемого разряда, состава плазмы, распределения концентрации и энергии компонентов плазмы, электрофизических и спектральных характеристик разряда, газогидродинамических и тепловых процессов в зоне формирования разряда, построение математических моделей пробоя и горения разряда. Наряду с этим разряды с жидкими электролитическими электродами находят широкое применение в различных отраслях промышленного производства. В области машиностроения данный тип разряда успешно применяется для обработки внешней и внутренней поверхностей деталей и узлов машин из различных типов металлов и сплавов. В области здравоохранения разряд применяется для стерилизации изделий медицинского назначения, очистки воды и воздуха. Известны работы российских [3–10] и зарубежных [11–14] научных групп в данной области науки.

Несмотря на интерес фундаментальной науки и широкие возможности практического применения данного типа разряда, большинство исследований касается частного случая, когда металлический электрод погружен или находится над жидкостью. В то время как всевозрастаю-

щее использование концентрированных потоков энергии и создание на этой основе технологических процессов требуют детального изучения физики и возможностей практического применения разряда, генерируемого между струйным жидким и металлическим электродами. С фундаментальной точки зрения необходимость таких исследований обусловлена тем, что многие положения физики газового разряда, генерируемого между твердыми электродами, недостаточны для описания процессов в разрядах, генерируемых в межэлектродном промежутке с добавлением струйного жидкого электрода. В данной системе генерации разряда возникают сложные нестационарные процессы, существует взаимозависимость между газогидродинамическими процессами в струе жидкости с особенностями формирования самого разряда, без учета которых построение объективных моделей нелинейных процессов в области низкотемпературной плазмы разрядов с жидкими электродами затруднено. В области прикладных исследований стоят актуальные задачи по локальной обработке поверхности изделий различного назначения с целью улучшения качества поверхностного слоя, где разряд со струйным жидким электродом может найти успешное применение.

Цель настоящей работы — экспериментальное исследование характеристик разряда, генерируемого между струйным жидким анодом и металлическим катодом при атмосферном давлении. Полученные результаты могут быть использованы при построении моделей нелинейных процессов в области низкотемпературной плазмы разрядов с жидкими электродами.

### Экспериментальная установка

Исследование разряда между струйным жидким анодом и металлическим катодом осуществлялось на установке (рис. 1), где: 1 — раствор электролита, 2 — электролитическая ячейка, 3 — пластина для подвода

Таблица 1. Параметры зажигания разряда

Напряжение $U$ , V	Ток $I$ , A	Давление внешней среды $p$ , Pa	Скорость течения струи жидкости $v$ , m/s	Диаметр струи $d$ , mm	Длина струи $l_c$ , mm	Удельная электропроводность электролита $\sigma$ , $\Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$
100–1000	0.4–5	$10^5$	0.1–0.4	3–5	10–30	0.1–0.12

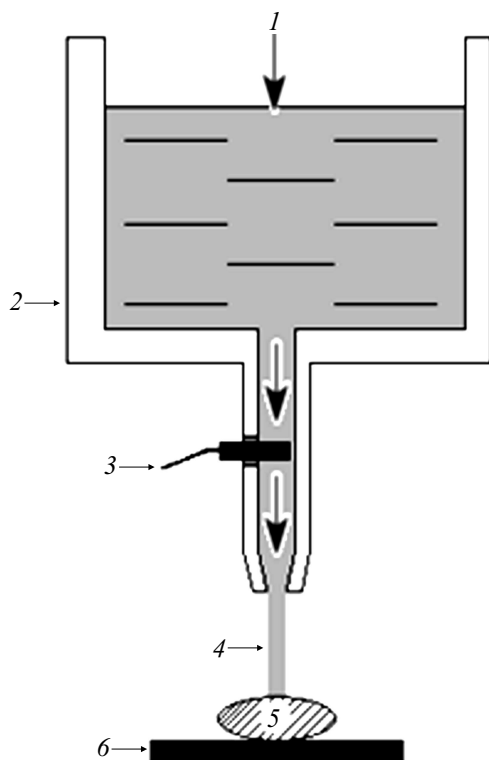


Рис. 1. Функциональная схема экспериментальной установки.

положительного потенциала в струю, 4 — струя, 5 — зона формирования разряда, 6 — металлический катод. В качестве электролита использовался 7% раствор NaCl в технической воде, а в качестве металлического катода — медная пластина марки М-1. В качестве источника питания использовался генератор постоянного тока, обеспечивающий подачу регулируемого постоянного напряжения до 4000 V при номинальном токе до 10 A.

Параметры зажигания разряда представлены в табл. 1.

Для решения поставленных задач применялись следующие методы исследования.

1. Исследования колебаний тока и напряжения газового разряда производились цифровым осциллографом марки „GDS-806S“.

2. Процесс горения газового разряда фиксировался с помощью цифровой фото-видеосъемки на аппаратуре марки „SONY FDR-AX33“.

3. Для инфракрасной термографии поверхности электродов в зоне горения газового разряда применялся тепловизор марки „FLIRA6500SC“, для обработки получен-

ных данных использовалось программное обеспечение ALTAIR v5.91.010.

4. Для визуализации пространственной структуры гидродинамических процессов в зоне горения газового разряда применялся шлирен-метод (метод Теплера). Принцип работы и оптическая схема шлирен-системы представлены в работе [15].

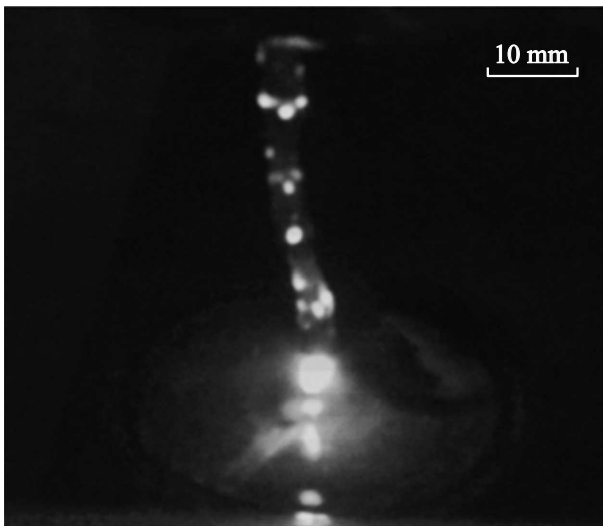
5. Спектр излучения плазмы разряда определялся оптико-волоконным спектрометром марки „PLASUS EC 150201 MC“ с коллиматором для фиксации световых лучей в диапазоне длин волн от 195–1105 nm. Спектральное разрешение прибора  $\delta\lambda = 1 \text{ nm}$ . Исследуемое излучение собиралось с разряда, оценка состава и компонентов плазмы выполнена без привязки к конкретной области. Расшифровка спектра выполнялась идентификацией линии при помощи сопоставления исследуемого спектра с базой данных Национального института стандартов и технологий (NIST).

## Обсуждение результатов

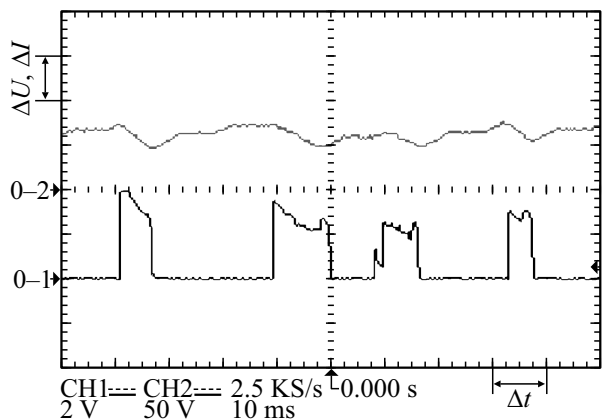
С подачей потенциала на электроды  $U = 200 \text{ V}$  при внешнем давлении  $p = 10^5 \text{ Pa}$  в цепи возникает постоянный ток замыкания  $I \approx 0.4 \text{ A}$ , при этом на поверхности медного катода наблюдается процесс интенсивного испарения электролита с образованием парогазовых пузырьков без формирования разряда. С увеличением  $U$  до 500 V в системе возникает пробой с образованием микроразрядов вдоль струи анода и на границе взаимодействия струйного анода и медного катода (рис. 2). Формирование микроразрядов вдоль струи анода объясняется тем, что в области утончения струи на границе между формирующимися каплями электролита возникает разность потенциала с дальнейшим пробоем и разрывом струи. При  $U = 500 \text{ V}$  микроразряды формируются в виде импульсов тока в диапазоне  $I \approx 1.8\text{--}2.2 \text{ A}$ , с частотой генерации  $\nu = 30\text{--}100 \text{ Hz}$ , с соответствующими микроразряду участками падения напряжения до 400 V, при этом ширина импульса составляет  $\tau = 2\text{--}10 \text{ ms}$ , что соответствует времени горения микроразряда в расширяющейся парогазовой оболочке. С увеличением  $U$  до 700 V фиксируется увеличение  $I \approx 2.2\text{--}4 \text{ A}$  с соответствующими разряду участками падения  $U$  до 500 V, при этом понижается  $\nu = 30\text{--}50 \text{ Hz}$  (рис. 3), что связано с увеличением энерговклада в микроразряд и возрастанием времени замыкания струйного жидкого катода на медный анод после пробоя. При повышении  $U$  до 1000 V возрастает  $I \approx 4\text{--}5 \text{ A}$  с соответствующими участками

падения  $U$  до 800 V, частота и ширина импульса тока меняется незначительно. Вкладываемая в разряд мощность составляет  $P \approx 0.72\text{--}4\text{ kW}$ .

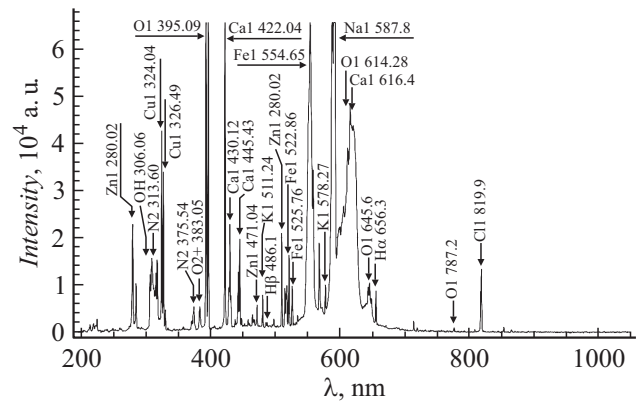
Из анализа спектра излучения разряда (рис. 4) следует, что в анализируемом участке плазмы присутствуют атомы и молекулы различного наименования (атомы цинка Zn I, меди Cu I, кислорода O I, кальция Ca I, калия K I, железа Fe I, натрия Na I, хлора Cl I, молекулы азота  $N_2$  и гидроксила OH). Аппаратное уширение в рассматриваемом спектре проверено по линиям K I (511.24 nm). Минимальная ширина одиночных линий составила  $\Delta\lambda_g = 1\text{ nm}$ , она и взята за оценку аппаратной ширины. Оценка концентрации электронов в плазме разряда определялась по нескольким водородным линиям серии Бальмера, однако регистрируемая интенсивность линии  $H_\beta$  едва превышает шумовую составляющую спектра, в связи с этим для оценки концентрации электронов использовалась линия  $H_\alpha$  (656.3 nm). Ширина



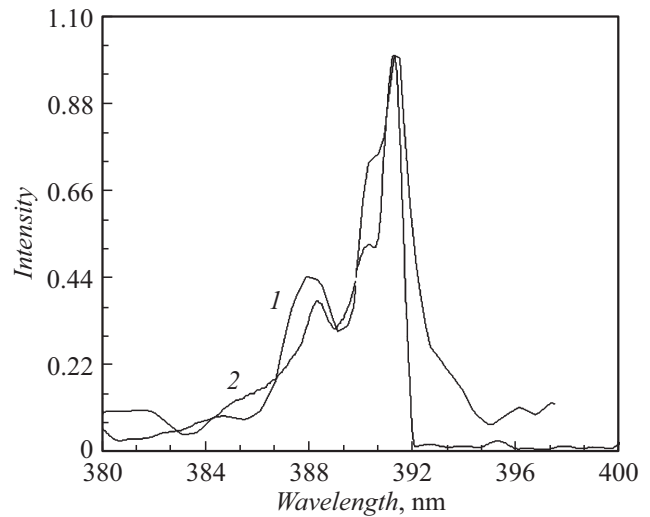
**Рис. 2.** Фотография разряда между струйным жидким анодом и медным катодом:  $U = 500\text{ V}$ ,  $I \approx 1.8\text{--}2.2\text{ A}$ ,  $l_c = 30\text{ mm}$ ,  $d_c = 4\text{ mm}$ ,  $p = 10^5\text{ Pa}$ .



**Рис. 3.** Колебания тока и напряжения разряда:  $\Delta U = 500\text{ V}$ ,  $\Delta I = 2\text{ A}$ ,  $\Delta t = 10\text{ ms}$ .



**Рис. 4.** Исследуемый спектр с отождествленными спектральными линиями.



**Рис. 5.** Сравнение экспериментального спектра с моделью для молекулярной полосы  $N_2$ : 1 — эксперимент, 2 — модель.

фойгтовского контура водородной линии  $H_\alpha$ , на ее полувысоте оказалась равна  $\Delta\lambda_f = 1.25\text{ nm}$ . С учетом аппаратного уширения в предположении фойгтовского контура регистрируемой линии лоренцевская составляющая линии равна  $\Delta\lambda_L = 0.43\text{ nm}$ . Согласно справочнику [16], величины  $\Delta\lambda_L$ , обусловленные линейным штарк-эффектом, соответствуют концентрациям электронов  $n_e = 3.77 \cdot 10^{16}\text{ cm}^{-3}$ . Для оценки температуры электронов предполагает наличие в плазме локального термодинамического равновесия [17,18]. Температура электронов определялась по атомным линиям одной кратности. Таким образом, температура электронов, рассчитанная по отношению интенсивности атомной линии Fe I 520.86 nm к атомной линии Fe I 525.76 nm, получилась равной 4600 K.

Оценка колебательной и вращательной температур молекул проводилась сравнением экспериментального молекулярного спектра с расчетным по модели с варьируемыми колебательной  $T_v$  и вращательной  $T_r$  темпе-

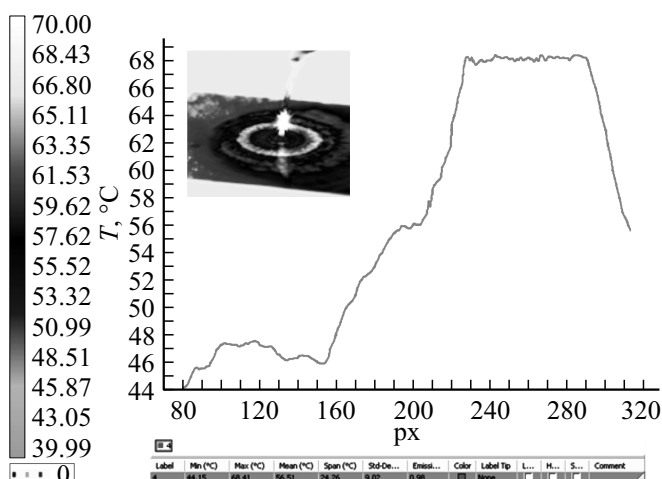


Рис. 6. Термограмма распределения температурных полей на поверхности струйного жидкого анода.

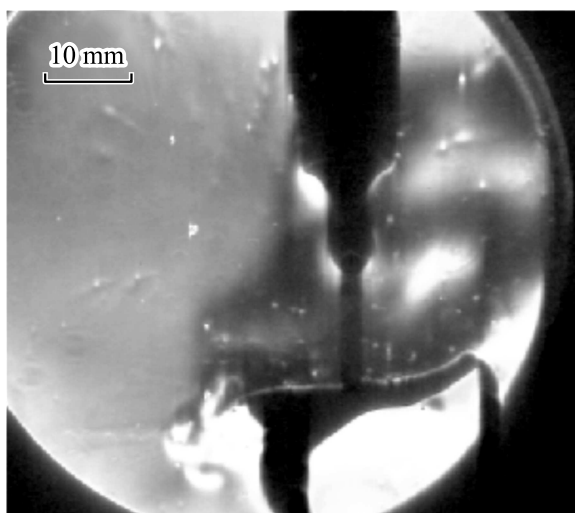


Рис. 7. Шлирен-изображение газогидродинамических процессов в зоне разряда между струйным жидким анодом и медным катодом.

ратурами в программном комплексе „Specair 2.2.0.0“. Оценка выполнена для полосы азота  $N_2$ , так как данная серия линий проявилась наиболее четко. Сравнение экспериментального и модельного спектров для молекулярной полосы представлено на рис. 5. При этом наилучшее совпадение получилось при температуре  $T_v = 3700$  К и  $T_r = 2150$  К с учетом условий, что молекулярная полоса в своей „голове“ перекрывается со спектральной линией  $\sim 306$  нм. Полученные данные по спектрам систематизированы в табл. 2.

Из анализа распределения температурных полей на поверхности струйного анода видно, что температура с места истечения струи до области формирования микроаряда возрастает от 44 до 68°C (рис. 6). Тогда как температура жидкости на поверхности медного катода циклично меняется от 48 до 59°C, что связано

Таблица 2. Сравнение параметров плазмы разряда

Атомы	Zn I, Cu I, O I, Ca I, K I, Fe I, Na I, Cl I
Молекулы	$N_{2+}$ , OH
$n_e$ , Концентрация электронов (по $H\alpha$ ), $cm^{-3}$	$3.77 \cdot 10^{16}$
$T_e$ , Температура электронов, К	4600
$T_v$ , Колебательная температура, К	3700
$T_r$ , Вращательная температура, К	2150

с прохождением участков горячей жидкости с зоны горения разряда.

На рис. 7 представлены шлирен-изображения газогидродинамических процессов, протекающих на границе раздела сред в зоне горения разряда между струйным жидким анодом и медным катодом, где темные области соответствуют скачку уплотнения, а светлые — разрежения. С подачей потенциала на электроды в цепи возникает постоянный ток замыкания и за счет джоулевого тепловыделения на границе между струйным жидким анодом и металлическим катодом протекает процесс испарения электролита с образованием на поверхности металлического электрода парогазовых пузырей. Если вкладываемая мощность недостаточна для ионизации межэлектродного промежутка, то в ней протекает процесс электролиза. Когда вкладываемая мощность достигает значения, достаточного для ионизации межэлектродного промежутка, то в парогазовых пузырях возникает пробой. Пробой сопровождается резким возрастанием тока и падением напряжения (рис. 3). В результате пробоя давление в парогазовых пузырях резко возрастает, что приводит к возникновению акустического хлопка с образованием ударных волн, которые распространяются в различных направлениях пространства. Ударные волны деформируют и отталкивают жидкий анод от металлического катода в случае формирования разряда на границе соприкосновения электродов или разрывают струю в случае зажигания разряда в струе. В связи с этим межэлектродное расстояние возрастает, сопротивление в нем увеличивается, разряд гаснет, ток падает до нуля и тепловыделение вокруг металлического катода уменьшается. Далее парогазовая оболочка „схлопывается“, и жидкость замыкается с поверхностью металлического катода. Это приводит к резкому локальному тепловыделению с образованием парогазовых пузырей и повторным пробоем. Этот процесс периодически повторяется с  $\nu \approx 30-100$  Hz.

## Заключение

1. Установлено формирование импульсных микроарядов в струе жидкости и на границе между струйным жидким анодом и медным катодом с вкладываемой

мощностью  $P \approx 0.72\text{--}4\text{ kW}$ , частотой пульсации тока  $\nu \approx 30\text{--}100\text{ Hz}$  и величиной тока импульса  $I \approx 1.8\text{--}5\text{ A}$ .

2. Концентрация электронов, полученная по уширению  $H_{\alpha}$ , равна  $n_e = (3.77 \pm 0.40) \cdot 10^{16}\text{ cm}^{-3}$ .

3. Вращательная и колебательная температуры молекулы  $N_2$  оцениваются в  $T_r = 2150\text{ K}$  и  $T_v = 3700\text{ K}$  соответственно.

4. Электронная температура, рассчитанная по отношению интенсивности атомной линии FeI 520.86 nm к атомной линии FeI 525.76 nm, получилась равной 4600 K.

Работа проведена в рамках выполнения государственного контракта по постановлению № 220 Министерства образования и науки РФ, проект № 14.Z.50.31.0023 от 04.03.2014 г.

## Список литературы

- [1] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. 3-е изд., перераб. и доп. Долгопрудный: Интеллект, 2009. 734 с.
- [2] Фортон В.Е., Сон Э.Е., Бромберг Л., Гайсин Ф.М., Сон К.Э., О Джон Хе, И Хе Ионг. Плазменные технологии (на корейском языке) МФТИ: КОФСТ, 2006. 135 с.
- [3] Andre P., Varinov Y.A., Faure G., Shkol'nik S.M. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2011. Vol. 44. N 37. P. 375202 (8 p.).
- [4] Акишев Ю.С., Грушин М.Е., Каральник В.Б., Монич А.Е., Панькин М.В., Трушкин Н.И., Холоденко В.П., Чугунов В.А., Жиркова Н.А., Ирхина И.А., Кобзев Е.Н. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. № 12. С. 1142.
- [5] Гайсин А.Ф., Сон Э.Е., Петряков С.Ю. // Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 7. С. 625–633.
- [6] Гайсин А.Ф., Сон Э.Е., Ефимов А.В., Гильмутдинов А.Х., Кашипов Н.Ф. // ТВТ. 2017. Т. 55. № 3. С. 472–475.
- [7] Gaisin A.F. // Inorganic Mater.: Appl. Res. 2017. Vol. 8. N 3. P. 392–395.
- [8] Chebakova V.Ju., Gaisin A.F., Zheltukhin V.S. // IOP Publishing IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Engineer. 2016. Vol. 158. P. 012024.
- [9] Максимов А.И., Титов В.А., Хлюстова А.В. // Химия высоких энергий. 2004. Т. 38. № 3. С. 227.
- [10] Белялетдинов Т.Ш., Горячев С.В., Ефимов А.В., Исакаев Э.Х., Чиннов В.Ф. // Опт. и спектр. 2010. Т. 109. № 5. С. 721.
- [11] Machala Z., Jedlovsky I., Chladekova L., Pongrac B., Giertl D., Janda M., Sikurova L., Polcic P. // Eur. Phys. J. D. 2009. Vol. 54. P. 195.
- [12] Pongrac B., Machala Z. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2011. Vol. 39. P. 2664.
- [13] Kim H.H., Teramoto Y., Negishi N., Ogata A., Kim J.H., Pongrac B., Machala Z., Gañán-Calvo Alfonso M. // J. Aerosol. Sci. 2014. Vol. 76. P. 98.
- [14] Bruggeman P., Leys Ch. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. Vol. 42. P. 053001 (28 p.).
- [15] Нагулин К.Ю., Ибрагимов Р.И., Цивильский И.В., Гильмутдинов А.Х. // Опт. журн. 2012. Т. 79. № 4. С. 33–41.
- [16] Касабов Г.А., Елисеев В.В. Спектроскопические таблицы для низкотемпературной плазмы. Спр. М.: Атомиздат, 1973. 160 с.
- [17] Методы исследования плазмы / Пер. с англ. Под ред. В. Лохте-Хольтгревена. М.: Мир, 1971. 552 с.
- [18] Биберман Л.М., Воробьев В.С., Якубов И.Т. Кинетика неравновесной изкотемпературной плазмы. М.: Наука, 1982. 378 с.