

DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-1-II-145-150

К ВОПРОСУ О НАРУШЕНИИ ЛОКАЛЬНОГО ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ В ПЛАЗМЕННОЙ СТРУЕ ДУГОВОГО АРГОНОВОГО ДВУХСТРУЙНОГО ПЛАЗМОТРОНА

© Алла Саввична Черевко, Анна Александровна Морозова

Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, г. Новосибирск, Россия; e-mail: ascherevko@ya.ru

*Статья поступила 10 октября 2018 г. Поступила после доработки 2 ноября 2018 г.
Принята к публикации 25 ноября 2018 г.*

Оценены степень и характер нарушения локального термодинамического равновесия (ЛТР) в аналитической зоне плазменной струи, генерируемой дуговым арговым двухструйным плазматроном (ДДП). Использован нетрадиционный способ, основанный на определении неравновесного параметра b_i , равного отношению действительной (определенной экспериментально) заселенности энергетического уровня (n_i) какого-либо элемента к заселенности этого же уровня, вычисленной из уравнения Саха (n_{is}). На примере Ca, Mg и Be установлено ионизирующее отклонение исследуемой плазмы от равновесного состояния, когда имеет место перезаселение только низколежащих атомных уровней. Показана явная зависимость величины b_i от потенциала ионизации рассматриваемого элемента. Результаты интерпретированы в свете усиления роли радиационных процессов при возбуждении спектров в ДДП.

Ключевые слова: дуговой аргоновый двухструйный плазматрон; локальное термодинамическое равновесие; радиационный распад; радиационная рекомбинация; неравновесный параметр.

ON THE VIOLATION OF LOCAL THERMODYNAMIC EQUILIBRIUM IN THE PLASMA JET OF AN ARGON ARC TWO-JET PLASMATRON

© Alla S. Cherevko, Anna A. Morozova

Institute of Solid Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia; e-mail: ascherevko@ya.ru

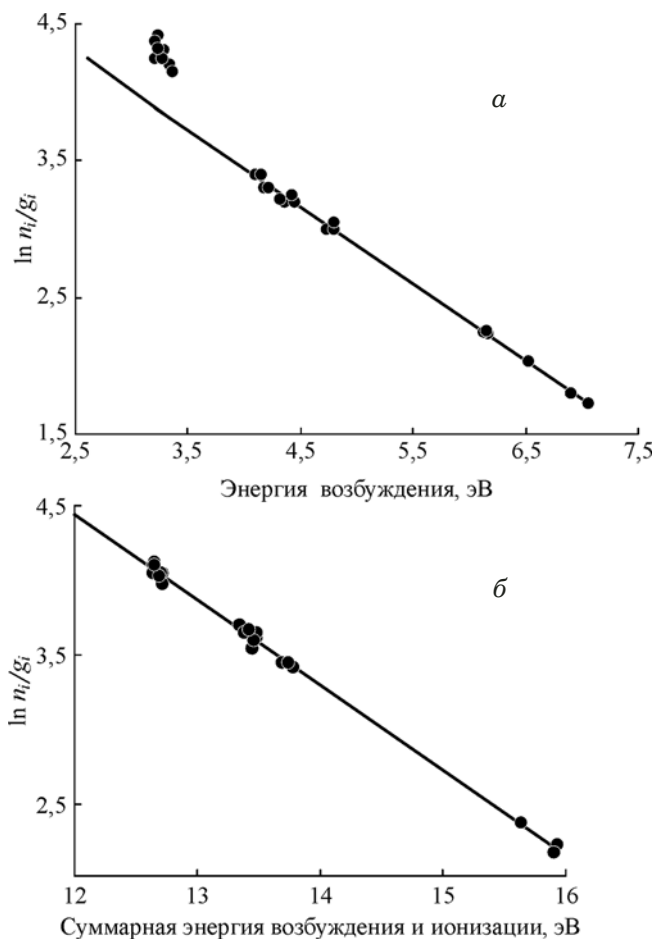
Received October 10, 2018. Revised November 2, 2018. Accepted November 25, 2018.

The degree and nature of the violation of local thermodynamic equilibrium (LTE) in the analytical zone of a plasma jet generated by an argon arc two-jet plasmatron (TJP) was estimated using an unconventional method based on determination of the nonequilibrium parameter b_i equal to the ratio of the experimentally determined actual population of the energy level (n_i) of the element to the population of the same level calculated from the Saha equation (n_{is}). Partial ionizing deviation of plasma under study from the equilibrium state takes place only when low-lying atomic levels are overpopulated. The distinct dependence of b_i on the ionization potential of the considered element (e.g., Ca, Mg, and Be) is shown. The results were interpreted in the light of the increasing role of radiation processes upon excitation of spectra in the argon arc two-jet plasmatron.

Keywords: argon arc two-jet plasmatron; local thermodynamic equilibrium; radiative decay; radiative recombination; nonequilibrium parameter.

В настоящее время в отечественной аналитической практике для многоэлементного атомно-эмиссионного анализа объектов сложного химического состава (горные породы, руды, минералы, почвы, материалы растительного и животного происхождения) в качестве источника возбуждения спектров нашел применение дуговой аргоновый двухструйный плазматрон (ДДП). От зарубежных аналогов ДДП отличается большей мощностью, позволяющей эффективно испарять

не только растворы, но и мелкодисперсные порошки, что важно при рутинном анализе твердых проб. Для управления аналитическим процессом в источниках света необходимо понимание многих фундаментальных аспектов, характеризующих плазму. К базисным понятиям атомно-эмиссионной спектроскопии (АЭС) относится представление о локальном термодинамическом равновесии (ЛТР) плазмы. Известно, что в плазме ДДП имеет место нарушение ЛТР, но незна-



Заселенность атомных (а) и ионных (б) энергетических уровней железа

чительное [1, 2]. Это малое отклонение от ЛТР создает принципиальную основу для благоприятных аналитических свойств ДДП: высокая интенсивность ионной эмиссии по сравнению с атомной, низкие пределы обнаружения, слабые матричные помехи, широкий диапазон линейности градуировочных графиков. Однако характер неравновесного состояния плазмы, генерируемой ДДП, изучен недостаточно.

В работе [1] мы оценили степень нарушения ЛТР в аналитической зоне плазменной струи ДДП при заданном (оптимальном для аналитических целей) режиме работы плазменного генератора. Для этой цели использовали традиционный способ, основанный на проверке выполнения Саха – Больцмановского распределения атомов и ионов определенного элемента по энергетическим состояниям. На рисунке представлены заселенности энергетических уровней, соответствующие 25 атомным и 26 ионным линиям железа.

Из рисунка видно, что имеет место нарушение больцмановского распределения только для низколежащих атомных уровней железа. «Тер-

мальным пределом», для которого проявляется отклонение плазмы от равновесного состояния, является энергетический уровень 4,0 эВ. Выше этого уровня атомы находятся в равновесии с ионами в основном состоянии через столкновительную ионизацию и рекомбинацию с электронами. Эти уровни поддерживают заселенность, очень близкую к равновесной. Однако атомы в низколежащих энергетических состояниях не находятся в Саха-равновесии с ионами в основном состоянии, и таким образом эти уровни перезаселены по сравнению с ЛТР. Такое состояние плазмы ДДП, запыленной твердым аэрозолем, определено как состояние частичного локального термодинамического равновесия (чЛТР). Наиболее вероятной причиной этого является нарушение доминирующего влияния столкновительных процессов с электронами. Надо полагать, что радиационные процессы, роль которых в состоянии ЛТР плазмы незначима, начинают вносить заметный вклад в заселение основных и низколежащих энергетических уровней. Настоящая работа является продолжением данного исследования.

Оценка роли радиационных процессов в нарушении равновесного состояния исследуемой зоны плазменной струи. Дальнейшие исследования неравновесного состояния плазмы ДДП проводили, используя метод, предложенный в работе [3]. Для более полной оценки отклонения плазменных источников света от ЛТР предложено использовать параметр b_i (назовем его «неравновесным»), который определяется как отношение действительной (установленной экспериментально) заселенности уровня (n_i) к заселенности этого же уровня, вычисленной из уравнения Саха (n_{is}). Таким образом, $b_i = n_i/n_{is}$. Особенно важен параметр $b_1 = n_1/n_{1s}$ — отклонение заселенности основного состояния атома от равновесного значения. Различают два предельных состояния неравновесной плазмы: если $b_1 > 1$, то плазма пребывает в ионизирующем режиме, а если $b_1 < 1$, то мы имеем дело с рекомбинирующей плазмой. Плазма определяется как ионизирующая, когда ее энергетическое состояние благоприятно для ионного производства. В рекомбинирующей плазме преобладают рекомбинационные процессы, а процессы ионизации протекают слабо. Ясно, что в неравновесной ионизирующей плазме наблюдается избыток атомов в основном состоянии относительно системы, находящейся в состоянии ЛТР (наш случай). В рекомбинирующей плазме основные состояния атома незаселены.

Поскольку плотность уровня n_i пропорциональна интенсивности соответствующей линии

[4, 5], на практике вместо параметра b_i удобнее использовать параметр

$$b_r = (I_i/I_a)_{\text{экс}}/(I_i/I_a)_{\text{ЛТР}}, \quad (1)$$

где $(I_i/I_a)_{\text{экс}}$ — ион/атомное отношение интенсивностей линий рассматриваемого элемента, полученное экспериментально, а $(I_i/I_a)_{\text{ЛТР}}$ — ион/атомное отношение интенсивностей линий этого же элемента, вычисленное из уравнения Саха. Показано [6], что параметр b_r обратно пропорционален параметру b_i .

При оценке неравновесного параметра b_r важно определить, что означает равновесное ион/атомное отношение интенсивностей линий $(I_i/I_a)_{\text{ЛТР}}$ по отношению к плазме, которая заведомо является неравновесной. Суть данного понятия убедительно представлена в публикациях, посвященных изучению неравновесного состояния индуктивно-связанной плазмы (ИСП) [3, 6 – 8]. Мы лишь в общих чертах остановимся на этом вопросе. «Для характеристики разряда, работающего при атмосферном давлении и находящегося в ЛТР, необходимо и достаточно измерить только один параметр — электронную плотность (n_e) или электронную температуру (T_e). Этот параметр полностью описывает заселенность уровней как аргона, так и аналита» [3]. Поэтому ключевым моментом для «приписания» характеристик ЛТР неравновесной плазме является определение электронной плотности методом, не зависящим от предположения существования ЛТР (например, по штарковскому уширению H_β линии). Измеренное таким образом значение n_e используют для вычисления по уравнению Саха электронной температуры T_e и $(I_i/I_a)_{\text{ЛТР}}$, присущих некой гипотетической равновесной аргоновой плазме, имеющей подобную электронную плотность. Эта гипотетическая ЛТР плазма затем становится основой для сравнения с реальными заселенностями энергетических уровней, определенными в исследуемой плазме экспериментально. Таким образом, степень отклонения плазмы от ЛТР может быть установлена сравнением экспериментально измеренного ион/атомного отношения интенсив-

ностей линий того или иного элемента с теоретическим равновесным отношением.

Экспериментальная часть. Оценка неравновесного параметра b_r . Эксперимент проводили при условиях, идентичных описанным в работе [1]: сила тока — 80 А; расход плазмообразующего газа (аргона) — 3,0 л/мин; мелкодисперсный исследуемый порошок взмучивали и вводили в плазму под давлением газа (аргона) с помощью специального приспособления; расход газа, транспортирующего порошок в струю плазмы — 1,0 л/мин; исследуемая аналитическая зона плазмы расположена на расстоянии ~10 мм от точки слияния струй (место области слияния струй с максимальным значением фона). Для регистрации спектров использовали аналитический комплекс: спектрометр PGS-2 (решетка 900 штр/мм), оснащенный многоканальным анализатором эмиссионных спектров МАЭС в комплекте с программным обеспечением «Атом». Это испытанные на практике «компромиссные условия» регистрации и возбуждения спектров при многоэлементном анализе порошковых проб.

Для оценки неравновесного параметра b_r выбраны элементы с различными энергиями ионизации (Ca, Mg и Be), характеристика которых приведена в табл. 1. В плазму вдували смеси, приготовленные на основе спектрально чистого графитового порошка с добавлением оксидов рассматриваемых элементов. Концентрации этих элементов в смеси подбирали таким образом, чтобы значение полезного сигнала (отношения интенсивностей спектральных линий к фону) находилось в пределах прямолинейного участка градуировочного графика. Все экспериментальные данные усредняли по результатам 3 – 5 измерений. Относительное стандартное отклонение полезного сигнала не превышало 0,10 – 0,12.

В задачу настоящего исследования не входило определение электронной плотности в плазменной струе ДДП по штарковскому уширению H_β линии (по техническим причинам это не представлялось возможным). Считали, что в исследуемой зоне ДДП концентрация электронов приблизительно равна $(1 - 5) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Полагаем,

Таблица 1. Характеристика атомных и ионных линий Ca, Mg, Be

Элемент и длина волны, нм	Энергия возбуждения, эВ	Энергия ионизации, эВ	$gA \cdot 10^8, \text{ с}^{-1}$	Ссылка
Ca I 422,67	2,93	6,11	6,54	[15]
Ca II 393,37	3,15		5,88	[15]
Mg I 285,21	4,34	7,64	14,85	[16]
Mg II 280,27	4,42		5,32	[16]
Be I 234,86	5,28	9,32	16,4	[17]
Be II 313,11	3,96		2,3	[17]

что эти значения n_e близки к реальным по следующим соображениям. Так, эффективное значение n_e в исследуемой зоне плазменной струи ДДП, полученное при идентичных нашим экспериментальных условиях возбуждения спектров, равно $1,6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ [9]. В аналитических зонах ИСП и плазмы, генерируемой дуговым аргоновым трехструйным плазматроном (ДТП), значения n_e (измеренные по штарковскому уширению H_β линии) примерно одинаковы и находятся на уровне $n \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, несмотря на различные способы генерации и различные конфигурации плазмы в этих источниках света. В обзоре [10] для ДТП в токопроводящих струях $n_e = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, а в аналитической зоне — $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Есть основание предположить, что и в ДДП электронная плотность близка к указанным значениям.

Таким образом, $(I_i/I_a)_{\text{ЛТР}}$, электронную температуру T_e и неравновесный параметр b_r вычисляли для четырех значений электронной плотности: $n_e = 5,0 \cdot 10^{14}$; $1,0 \cdot 10^{15}$; $5,0 \cdot 10^{15}$; $1,0 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Это давало возможность оценить влияние неопределенности в выборе n_e на поведение неравновесного параметра. Как будет показано ниже, несмотря на грубое допущение в оценке электронной плотности, для всех приведенных значений n_e наблюдается основополагающая тенденция в поведении неравновесного параметра b_r .

Электронную температуру T_e вычисляли, используя уравнение Саха. Такой способ определения T_e в неравновесной плазме оправдан при условии, если эта плазма достаточно близка к ЛТР. Близость плазмы ДДП к ЛТР показана выше [1]. Для выбранных значений n_e получили

соответствующие значения T_e : 7317; 7736; 8919; 9546 К. Аналогичные расчеты для $n_e = (1,0 \cdot 10^{14} - 1,0 \cdot 10^{16}) \text{ см}^{-3}$ проведены в работе [11]. Используя эти значения n_e и T_e , рассчитывали значение равновесного ион/атомного отношения для каждого из рассматриваемых элементов по уравнению Саха, представленному в виде [12]

$$(I_i/I_a)_{\text{ЛТР}} = 4,83 \cdot 10^{15} / n_e (A_{qp} g_q / \Lambda_{qp})_{\text{ion}} \times (A_{qp} g_q / \Lambda_{qp})_{\text{atom}} T_e^{3/2} \cdot 10^{-5040(E_{\text{ion}} + E_{qi} - E_{qa}) / T_e}, \quad (2)$$

где n_e — электронная плотность (см^{-3}); g_q — статистический вес уровня q атома или иона; A_{qp} — вероятность перехода иона или атома в состоянии q (с^{-1}); E_{ion} — потенциал ионизации атома (эВ); E_{qi} — энергия возбуждения иона в состоянии q (эВ); E_{qa} — энергия возбуждения атома в состоянии q (эВ); T_e — электронная температура.

Уравнение (2) легко получить путем комбинации уравнений Саха и Больцмана, подставив соответствующие константы.

В табл. 2 приведены результаты расчетов $(I_i/I_a)_{\text{ЛТР}}$, экспериментальные значения $(I_i/I_a)_{\text{экс}}$ и неравновесный параметр b_r для выбранных спектральных линий Ca, Mg и Be. Таблица показывает, что экспериментальное ион/атомное отношение интенсивностей для этих элементов меньше вычисленного равновесного отношения. Неравновесный параметр b_r для всех рассматриваемых элементов меньше единицы. При этом отклонение b_r от равновесного значения ($b_r = 1$) невелико, т.е. $0,084 < b_r < 0,95$ в зависимости от элемента и значения n_e . Полученные численные значения неравновесного параметра ($b_r < 1$) подтверждают наши более ранние исследования: запыленная мелкодисперсным аэрозолем аналитическая зона струи плазмы, генерируемой ДДП, пребывает в ионизирующем состоянии чЛТР [1]. Считается, что ионизирующий неравновесный режим формируется в процессе быстрого нагревания плазмы [13] и определяет ее готовность к активной ионизации. В исследуемой плазме это условие реализуется, когда смесь холодного газа и твердого аэрозоля, введенная в разряд, нагревается до температуры окружающей среды.

Следует отметить, что значение b_r зависит от потенциала ионизации рассматриваемого элемента. Так, b_r для бериллия ($E_{\text{ion}} = 9,32$ эВ) намного ближе к единице (т.е. к равновесному значению), чем для магния ($E_{\text{ion}} = 7,64$ эВ) и тем более для кальция ($E_{\text{ion}} = 6,11$ эВ). Следует подчеркнуть, что такая тенденция наблюдается для всех выбранных значений электронной плотности, даже принимая во внимание грубый подход к установлению концентрации электронов

Таблица 2. Значения экспериментального и равновесного ион-атомных отношений интенсивностей линий Ca, Mg, Be и неравновесного параметра b_r

Элемент и длина волны, нм	$(I_i/I_a)_{\text{экс}}$	$(I_i/I_a)_{\text{ЛТР}}$	b_r	$n_e, \text{ см}^{-3}$
Ca I 422,67	21,5	254,97	0,084	$5 \cdot 10^{14}$
Ca II 393,37		238,63	0,09	$1 \cdot 10^{15}$
		208,19	0,10	$5 \cdot 10^{15}$
		197,5	0,11	$1 \cdot 10^{16}$
Mg I 285,21	2,46	10,61	0,23	$5 \cdot 10^{14}$
Mg II 280,27		11,18	0,22	$1 \cdot 10^{15}$
		12,88	0,19	$5 \cdot 10^{15}$
		13,66	0,18	$1 \cdot 10^{16}$
Be I 234,86	1,88	1,96	0,95	$5 \cdot 10^{14}$
Be II 313,11		2,11	0,89	$1 \cdot 10^{15}$
		2,58	0,73	$5 \cdot 10^{15}$
		2,85	0,66	$1 \cdot 10^{16}$

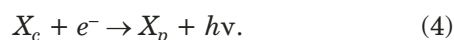
в аналитической зоне исследуемой плазменной струи.

Очевидная зависимость неравновесного параметра от энергии ионизации элемента предполагает, что одной из причин отклонения плазмы ДДП от равновесного состояния является нарушение ионизационного равновесия, увеличивающее заселенности основных и низколежащих атомных энергетических уровней. Как показывает эксперимент, это увеличение тем значительнее, чем меньше потенциал ионизации рассматриваемого элемента.

Обратимся теперь к литературным источникам. Автор работы [14], изучая механизм возбуждения аналита в ИСП, рассчитал скорости всех столкновительных и радиационных процессов для плазмы с $n_e = 3,34 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и $T_e = 8200 \text{ К}$. Вывод таков: отклонение от ЛТР в такой плазме происходит вследствие исключительного вклада в заселение основного состояния атома радиационного распада



и радиационной рекомбинации



Ясно, что вклад означенных радиационных процессов в нарушение равновесия в плазме связан с потенциалом ионизации того или иного элемента. С увеличением заселенности основного состояния иона заселенность основного состояния атома также будет увеличиваться. Выбранные значения n_e и T_e близки к соответствующим значениям для исследуемой нами плазменной струи. В связи с этим можно допустить, что полученные нами экспериментальные данные подтверждают основополагающее заключение работы [14].

Таким образом, при возбуждении спектров в ДДП электронные соударения и радиационные процессы одинаково важны. В плазме ДДП перезаселение низколежащих уровней происходит вследствие радиационного распада (3) высоковозбужденных уровней и радиационной рекомбинации (4). Для элементов с более низким потенциалом ионизации перезаселение низколежащих уровней проявляется в большей степени. При более детальном и глубоком изучении этого вопроса, если будет установлено количественное соотношение между действительной и равновесной заселенностями в ДДП, поведение исследуемых элементов может стать предсказуемым. Необходимо дальнейшее изучение механизма возбуждения спектров в плазменной струе ДДП. Выявление преобладающих процессов в плазме и поиск пути воздействия на них представляется важным

в свете совершенствования аналитических возможностей метода АЭС с ДДП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черевко А. С. Исследование степени нарушения локального термодинамического равновесия в аналитической зоне дугового аргонового двухструйного плазматрона / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 1. Ч. II. С. 42 – 47.
2. Zaksas N. P., Gerasimov V. A. Consideration on excitation mechanisms in a high-power two-jet plasma / Spectrochim. Acta. 2013. Vol. 88. P. 174 – 179.
3. Raaymakers I. J. M. M., Boumans P. W. J. M., Van Der Sijde B., Schram D. C. A theoretical study and experimental investigation of non-LTE phenomena in an inductively-coupled argon plasma — I. Characterization of the discharge / Spectrochim. Acta. 1983. Vol. 38B. N 5 – 6. P. 697 – 706.
4. Drawin H. W. High pressure — high temperature. Vol. 2. 1970. — 359 p.
5. Walker Z., Blades M. W. Measurement of excited state level populations for atomic and ionic iron in the inductively coupled plasma / Spectrochim. Acta. 1986. Vol. 41B. N 8. P. 761 – 775.
6. Caughlin B. L., Blades M. W. Analyte ionization in the inductively coupled plasma / Spectrochim. Acta. 1985. Vol. 40B. N 10 – 12. P. 1539 – 1554.
7. Schram D. C., Raaymakers I. J. M. M., Van Der Sijde B., et al. Approaches for clarifying excitation mechanisms in spectrochemical excitation sources / Spectrochim. Acta. 1983. Vol. 38B. N 11/12. P. 1545 – 1557.
8. Caughlin B. L., Blades M. W. An evaluation of ion-atom emission intensity ratios and local thermodynamic equilibrium in an argon inductively coupled plasma / Spectrochim. Acta. 1984. Vol. 39B. N 12. P. 1583 – 1602.
9. Тагильцева Е. А., Тагильцев А. П., Зуев Б. К. Оценка электронной концентрации в плазме дуги двухструйного плазматрона. / Научные ведомости БелГУ. 2008. Т. 49. № 9. С. 172 – 176.
10. Miller M., Zander A. T. Thermal pinch effect in the argon plasma / Spectrochim. Acta. 1986. Vol. 41B. N 5. P. 453 – 459.
11. Blades M. W., Lee Nelson. A spatial study of electron density and analyte emission in a d.c. argon plasma / Spectrochim. Acta. 1984. Vol. 39B. N 7. P. 879 – 890.
12. Boumans P. W. J. M., de Boer F. J. An experimental study of a 1-kW, 50-MHz RF inductively coupled plasma with pneumatic nebulizer, and a discussion of experimental evidence for a non-thermal mechanism / Spectrochim. Acta. 1977. Vol. 32B. P. 365 – 395.
13. Parc C. Calculation of radiative properties of nonequilibrium hydrogen plasma / Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 1979. Vol. 22. P. 101 – 112.
14. Lovett R. J. A rate model of inductively coupled argon plasma analyte spectra / Spectrochim. Acta. 1982. Vol. 37B. N 11. P. 969 – 985.
15. Wiese W. L., Martin G. A. Wavelengths and transition probabilities for atoms and ions. Part II. — Washington: NSRDS — NBS 68, 1980. — 148 p.
16. Корлисс Ч., Бозман У. Вероятности переходов и силы осцилляторов 70 элементов. — М.: Мир, 1968. — 562 с.
17. Wiese W. L., Smith V. W., Glennon B. M. Atomic transition probabilities. Vol. 1. — Washington, DC: U. S. Department of Commerce, 1966. — 169 p.

REFERENCES

1. Cherevko A. S. Study of the degree of violation of local thermodynamic equilibrium in analytical zone of two-jet plasmatron / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2015. Vol. 81. N 1. Part II. P. 42 – 47 [in Russian].
2. Zaksas N. P., Gerasimov V. A. Consideration on excitation mechanisms in a high-power two-jet plasma / Spectrochim. Acta. 2013. Vol. 88. P. 174 – 179.
3. Raaymakers I. J. M. M., Boumans P. W. J. M., Van Der Sijde B., Schram D. C. A theoretical study and experimental

- investigation of non-LTE phenomena in an inductively-coupled argon plasma — I. Characterization of the discharge / *Spectrochim. Acta*. 1983. Vol. 38B. N 5 – 6. P. 697 – 706.
4. **Drawin H. W.** High pressure — high temperature. Vol. 2. 1970. — 359 p.
 5. **Walker Z., Blades M. W.** Measurement of excited state level populations for atomic and ionic iron in the inductively coupled plasma / *Spectrochim. Acta*. 1986. Vol. 41B. N 8. P. 761 – 775.
 6. **Caughlin B. L., Blades M. W.** Analyte ionization in the inductively coupled plasma / *Spectrochim. Acta*. 1985. Vol. 40B. N 10 – 12. P. 1539 – 1554.
 7. **Shram D. C., Raaymakers I. J. M. M., Van Der Sijde B., et al.** Approaches for clarifying excitation mechanisms in spectrochemical excitation sources / *Spectrochim. Acta*. 1983. Vol. 38B. N 11 – 12. P. 1545 – 1557.
 8. **Caughlin B. L., Blades M. W.** An evaluation of ion-atom emission intensity ratios and local thermodynamic equilibrium in an argon inductively coupled plasma / *Spectrochim. Acta*. 1984. Vol. 39B. N 12. P. 1583 – 1602.
 9. **Tagil'ceva E. A., Tagil'cev A. P., Zuev B. K.** Evaluation of electron density in the two-jet plasmatron arc plasma / *Nauch. Vedom. BelGU*. 2008. Vol. 49. N 9. P. 172 – 176 [in Russian].
 10. **Miller M., Zander A. T.** Thermal pinch effect in the argon plasma / *Spectrochim. Acta*. 1986. Vol. 41B. N 5. P. 453 – 459.
 11. **Blades M. W., Lee Nelson.** A spatial study of electron density and analyte emission in a d.c. argon plasma / *Spectrochim. Acta*. 1984. Vol. 39B. N 7. P. 879 – 890.
 12. **Boumans P. W. J. M., de Boer F. J.** An experimental study of a 1-kW, 50-MHz RF inductively coupled plasma with pneumatic nebulizer, and a discussion of experimental evidence for a non-thermal mechanism / *Spectrochim. Acta*. 1977. Vol. 32B. P. 365 – 395.
 13. **Parc C.** Calculation of radiative properties of nonequilibrium hydrogen plasma / *Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 1979. Vol. 22. P. 101 – 112.
 14. **Lovett R. J.** A rate model of inductively coupled argon plasma analyte spectra / *Spectrochim. Acta*. 1982. Vol. 37B. N 11. P. 969 – 985.
 15. **Wiese W. L., Martin G. A.** Wavelengths and transition probabilities for atoms and ions. Part II. — Washington: NSRDS — NBS 68, 1980. — 148 p.
 16. **Corliss Ch. H., Bozman W. R.** Experimental Transition Probabilities for Spectral Lines of Seventy Elements. — Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office. — 562 p.
 17. **Wiese W. L., Smith V. W., Glennon B. M.** Atomic transition probabilities. Vol. 1. — Washington, DC: U. S. Department of Commerce, 1966. — 169 p.