

УДК 629.78:628.9.041:535.3

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ПЛАЗМЫ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО МИКРОДВИГАТЕЛЯ

В. И. Горбунков, В. В. Косицын, В. И. Рубан, В. В. Шалай
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

DOI: 10.25206/2310-9793-2017-5-2-32-36

Аннотация – Применяются методы кинетической теории газов для оценки параметров плазмы дугового разряда электротермического микродвигателя корректирующих двигательных установок. Известное утверждение об адиабатическом характере процесса сжатия за счет роста температуры газа находит подтверждение в изменении его спектрального состава и эффекте Доплера. Вхождение вольфрама в состав деталей конструкции сопла микродвигателя объясняет появление атомов этого элемента в объеме плазмы, позволяет косвенно судить о температуре дугового разряда, его характере, а по поглощению длинноволнового крыла контура линии при $\lambda = 465,987$ нм обосновать заключение о расходовании материала катода в процессе эксплуатации электродугового микродвигателя. Доплеровский сдвиг линий излучения аргона позволяет оценить скорость истечения струи газа. Результаты исследования могут быть использованы при конструировании летательных аппаратов.

Ключевые слова: электродуговой микродвигатель, разряд аргона, разряд вольфрама, эффект Доплера.

I. ВВЕДЕНИЕ

Особенностями корректирующих двигательных установок малых космических аппаратов (КДУ МКА) [1] является замкнутый объем небольшого размера, занимаемый плазмой, обтекаемой газом. Межэлектродное расстояние сравнимо с диаметром полости и не превышает нескольких миллиметров. В дуговой камере, стенки которой нагреты до определенной температуры, частицы вещества испускают и поглощают фотоны, в большей или меньшей степени, может устанавливаться равновесие между частицами вещества и излучением [2]. Законы равновесного излучения играют в кинетической теории газов важную роль и близость к ним определяют точность оценок параметров плазмы двигательных установок.

Например, на основании Ленгмюровских зондовых измерений, выполненных в [3], в факеле реактора реактивного 1...2-киловаттного двигателя при давлении аргона $P_{Ar} = 6$ атм. было замечено, что электронная температура оказалась на 1–2 эВ выше, чем температура нейтрального газа в факеле. Плотность электронов находилась в диапазоне $10^{10} - 10^{13} \text{ см}^{-3}$, что также намного выше равновесия Саха для температуры ($T_{Ar} \approx 1000 \text{ К}$) и концентрации газа ($n_{Ar} \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$), но значительно ниже равновесной для электронной температуры, что не позволяло достичь согласия между моделью теплового равновесия и экспериментом. Это позволило авторам [3] прийти к заключению, что температура $T_e = 1...2$ эВ наиболее полно отражает электронную температуру в дуге.

В работе [4] проведено моделирование электротермической 240-ваттной дуговой двигательной установки в приближении квазинейтральной плазмы. Рассмотрена трехкомпонентная при $P = 2,5$ атм плазма из атомов аргона, их ионов и электронов. Отмечена близость значений электронной температуры $T_e = 16\,000 \text{ К}$ максимальным осевым газовым температурам $T_{Ar,0} = 11\,500 \text{ К}$ вблизи суживающей части сопла, а также их раздельного снижения до 5000 К и 3300 К при выходе из двигателя. Наблюдаемое в пределах 30% расхождения тепловое равновесное состояние между осевой электронной и газовой температурой существенно нарушается в расширяющейся части сопла из-за падения электронной плотности в радиальном направлении. Высокий уровень электронной температуры повышает уровень ионизации и электропроводности при охлаждении газового слоя вблизи стенок камеры электродугового двигателя, что позволило считать плазму квазинейтральной, а поверхности электродов принять адиабатическими для T_e .

Вместе с тем известно [5], что при нагревании газа без теплообмена с окружающими телами наблюдается адиабатическое сжатие за счет роста температуры газа и, согласно эффекта Доплера, должен меняться его спектральный состав. Модель [6] позволяет увидеть, каким образом меняется спектр излучения плазмы электротермического микродвигателя при переходе через сопло. Воспользуемся экспериментальной установкой [6] для анализа параметров многокомпонентной плазмы электротермического микродвигателя с учетом материала анода, так как в установлении равновесия между веществом и излучением не важно, при столкновении с какими частицами происходит возбуждение атомов.

II. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Исследовалась модель дугового электротермического микродвигателя (ДЭТМД) (рис. 1). Разрядная полость представляет собой кварцевую трубку толщиной 1.3 мм, диаметром 6.4 мм, геометрически расположенную внутри цилиндрического корпуса микродвигателя [6].

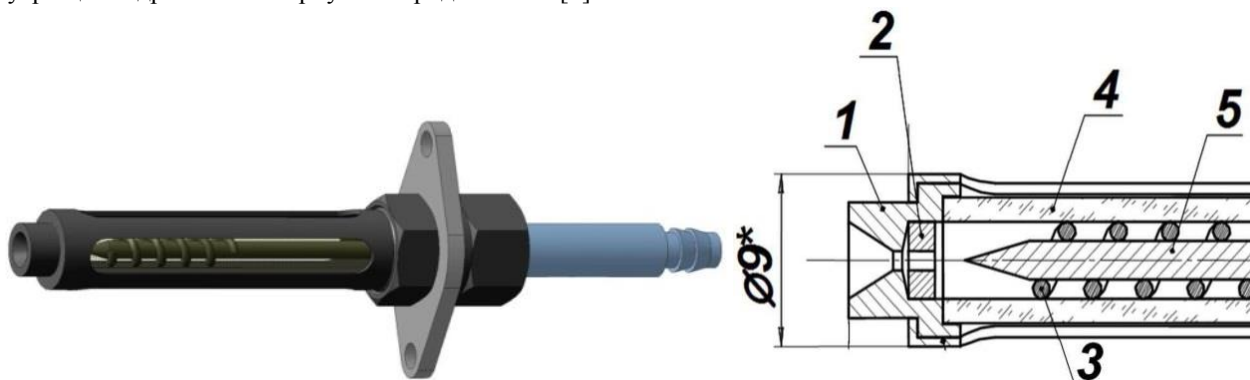


Рис. 1. Модель дугового электротермического микродвигателя [6] и его фрагмент: 1 – сопло, 2 – анод, 3 – завихритель потока газа, 4 – трубка из кварцевого стекла, 5 – катод; на рисунке слева хорошо видна в стенке микродвигателя апертура размером 5×50 мм для оптических регистраций

Межэлектродное расстояние между катодом 5 и кромкой кольцевого анода 2 составляет 3÷5 мм. Материал электродов – вольфрам. Буферный газ аргон подается в полость через завихритель под давлением $(1,03–1,08) \times 101,3 \times 10^3$ Па.

Питание осуществлялось стандартным блоком питания «Tetriх 230». Ток разряда измерялся шунтом сопротивлением 1 Ом, а напряжение на разряде с помощью омического делителя 11.9/43.8 кОм с помощью осциллографа «RIGOLDS 2202». Конструкция блока питания разряда не предусматривала изменения напряжения, поэтому оценка параметров разряда была проведена при токе $I_R = 3.8 \div 4.2$ А и соответствующем падении напряжения $U_R = 16,8 \div 19,0$ В.

Регистрация рабочей температуры стенки кварцевой трубки (420÷450 К) и внешней стенки сопла (900–1100 К) проводилась хромель-алюмелиевыми термопарами.

Спектральные измерения проводились с помощью пятиканального модульного калиброванного радиометрического комплекса «Ava-Spec-ULS204L- 5-RM», спектральный диапазон которого составлял 235 ÷ 815 нм, оптическое разрешение в диапазоне 296–400 нм составляло 0,07 нм, в диапазоне 605–815 нм не менее 0.15 нм. Для одновременного задействования пяти каналов использовалась фокусируемая коллимационная линза 25 мм с адаптером SMA. Динамический диапазон изменения интенсивностей спектральных линий достигал 60 000. Экспозиция могла меняться от 50 мс до 1 мин. Это обеспечивало возможность регистрации спектра в линейном режиме изменения интенсивностей исследуемых спектральных линий.

Исследовался спектр излучения разряда через стенку кварцевой трубки под углом 90° к оси микродвигателя; излучение выводилось на спектрограф из апертуры, позволяющей наблюдать свечение полного разряда в поперечном направлении относительно корпуса двигателя. Для анализа были получены также спектры осевого излучения сопла модели микродвигателя.

При измерениях расстояние между апертурой и коллимационной линзой составляло 110 мм, при измерениях продольного излучения сопла, расстояние до сопла равнялось 420 мм. Оптические измерения проводились после выхода модели электротермического двигателя в стационарный режим работы.

Температура помещения лаборатории составляла 20°С.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При рабочих параметрах блока питания были проведены измерения и расчет плотности тока разряда при известном диаметре положительного столба разряда $d = 0.5 \div 1.0$ мм. (Высокая плотность свечения разряда не позволила визуально определить диаметр с высокой точностью.) Найденная плотность тока $j = (121–538,5) \text{ А/см}^2$ дает возможность оценить величину электронной концентрации в дуговом разряде.

Необходимая дрейфовая скорость электронов V_d может быть получена из соображения, что электроны в газовом промежутке $L_e = 0.3 \dots 0.5$ см движутся в атмосфере аргона, концентрация которого определяется выражением $N_{Ar} = P_{Ar}/kT = 2.45 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Известно, что подвижность электронов зависит от напряженности электрического поля, а в ряде случаев ведет к специфической неустойчивости газоразрядной плазмы. Принимая во вни-

мание зависимость дрейфовой скорости электронов в аргоне от приведенной напряженности электрического поля [7] $E/N_{Ar} = 0.18-0.3$ Тд в приближении малой плотности электронов, искомое значение $V_d = (3...6) \times 10^5$ см s^{-1} . Плотность тока дугового разряда $j = en_e V_d = (121...538.5)$ А/см² позволяет оценить электронную концентрацию $n_e = (1.2...5.6) \times 10^{15}$ см⁻³. Поток электронов под действием внешнего электрического поля возбуждает плазму газового разряда. Поток заряженных частиц нагревает электроды до весьма высокой температуры и, судя по эрозии катода, достигает температуры плавления вольфрама $T_w \approx 3700$ К, что позволяет оценить концентрацию атомов вольфрама по давлению насыщенных паров [8].

Концентрация паров вольфрама, соответствующая давлению паров $p_w = 5 \times 10^{-2}$ мм.рт. ст. (6.67 Па) при $T_w = 3655$ К, составляет $n_w \approx 1.32 \times 10^{14}$ см⁻³.

На рис. 2 представлен спектр излучения плазмы дугового разряда модели ДЭТМД.

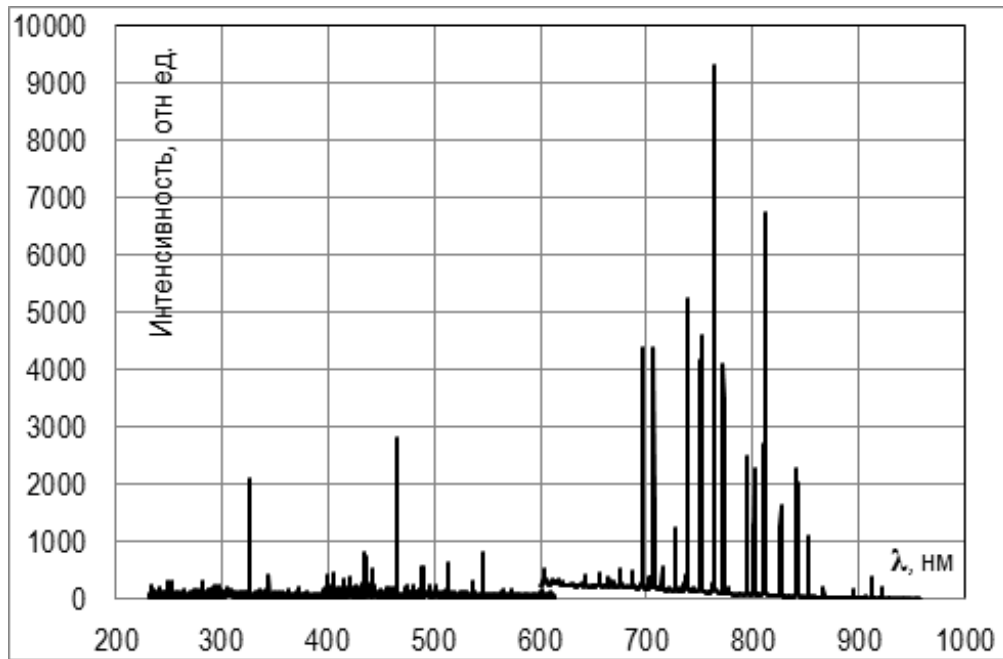


Рис. 2. Спектр излучения разряда, наблюдаемый через сопло

На рис. 2 отчетливо виден ряд спектральных линий в видимом диапазоне (462...547) нм, которые принадлежат атомам вольфрама (табл. 1).

Все заметные спектральные линии на рис.3 относятся к линиям аргона (табл. 2).

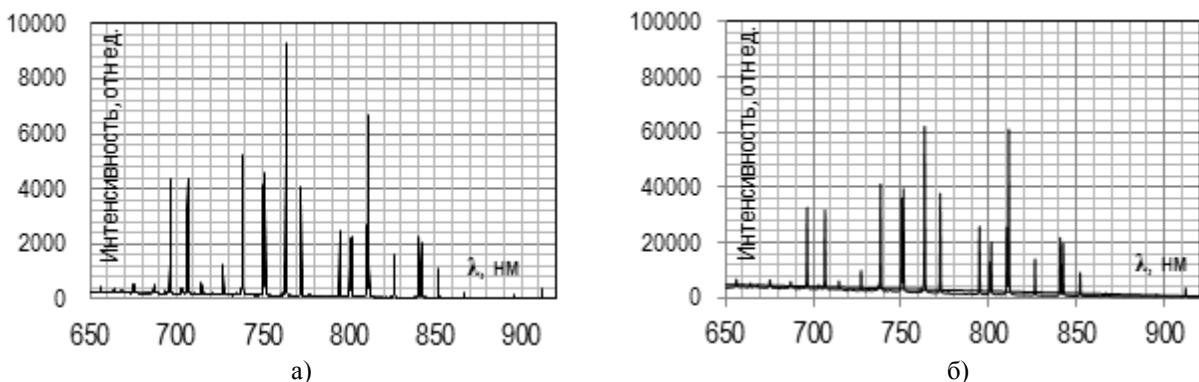


Рис. 3. Участок спектра (667...930) нм (а) – снятый через сопло и (б) – через апертуру.

Из сравнения рис. 3а–б видно, что интенсивность линий излучения из сопла в области 650...850 нм, по сравнению с излучением через апертуру, уменьшилась почти на порядок за счет увеличения расстояния до регистратора.

ТАБЛИЦА 1
СПЕКТР АТОМОВ ВОЛЬФРАМА

(в скобках приведена относительная интенсивность линии)

№	$\lambda_{\text{таб}}$, нм [10]	λ_1 , нм (апертура)	λ_2 , нм (сопло)
1	462.055 (20)	462.0 (818)	462.0 (123)
2	464.256 (30)	464.2 (869)	464.2 (531)
3	465.987 (200)	465.2 (2817)	465.2 (3221)
4	487.828 (30)	487.8 (1041)	487.8 (550)
5	489.244 (25)	489.2 (1236)	
6	500.616 (40)		500.7 (259)
7	513.0	512.6	
8	546.9	546.0	

ТАБЛИЦА 2
СПЕКТР АТОМОВ АРГОНА

спектр1 – снят через апертуру, спектр2 – через сопло

№	$\lambda_{\text{таб}}$ [9]	$\lambda_{\text{сп1}}$ апертура	$\lambda_{\text{сп2}}$ сопло	Переход по Пашену [11]	L → S переход [11]
1	696.543	696.4	696.4	$^1P_1 \rightarrow ^3P_2$ $2p_2 \rightarrow 1s_5$	$4p^2[1/2]_1 \rightarrow 4s^2[3/2]_2$
2	706.722	706.7	706.7	$^3P_2 \rightarrow ^3P_2$ $2p_3 \rightarrow 1s_5$	$4p^2[3/2]_2 \rightarrow 4s^2[3/2]_2$
3	714.704	714.6		$^3P_1 \rightarrow ^3P_2$ $2p_4 \rightarrow 1s_5$	$4p^2[3/2]_1 \rightarrow 4s^2[3/2]_2$
4	727.294	727.2		$^1P_1 \rightarrow ^3P_1$ $2p_2 \rightarrow 1s_4$	$4p^2[1/2]_1 \rightarrow 4s^2[3/2]_1$
5	738.398	738.4	738.4	$^3P_2 \rightarrow ^3P_1$ $2p_3 \rightarrow 1s_4$	$4p^2[3/2]_2 \rightarrow 4s^2[3/2]_1$
6	750.387	750.3	750.3	$^1S_0 \rightarrow ^1P_1$ $2p_1 \rightarrow 1s_2$	$4p^2[1/2]_0 \rightarrow 4s^2[1/2]_1$
7	751.465	751.3	751.3	$^3P_0 \rightarrow ^3P_1$ $2p_5 \rightarrow 1s_4$	$4p^2[1/2]_0 \rightarrow 4s^2[3/2]_1$
8	763,511	763.5	763.5	$^3D_2 \rightarrow ^3P_2$ $2p_6 \rightarrow 1s_5$	$4p^2[3/2]_2 \rightarrow 4s^2[3/2]_2$
9	772,376	772.3	772.3	$^3D_1 \rightarrow ^3P_2$ $2p_7 \rightarrow 1s_5$	$4p^2[3/2]_1 \rightarrow 4s^2[3/2]_2$
10	794.815	794.8	794.6	$^3P_1 \rightarrow ^3P_0$ $2p_4 \rightarrow 1s_3$	$4p^2[3/2]_1 \rightarrow 4s^2[1/2]_0$
11	800,616	800.6	800.4	$^3D_2 \rightarrow ^3P_1$ $2p_6 \rightarrow 1s_4$	$4p^2[3/2]_2 \rightarrow 4s^2[3/2]_1$
12	801,479	801.3	801.3	$^3D_2 \rightarrow ^3P_2$ $2p_8 \rightarrow 1s_5$	$4p^2[5/2]_2 \rightarrow 4s^2[3/2]_2$
13	810.369	810.3	810.2	$^3D_1 \rightarrow ^3P_1$ $2p_7 \rightarrow 1s_4$	$4p^2[3/2]_1 \rightarrow 4s^2[3/2]_1$
14	811.531	811.4	811.4	$^3D_3 \rightarrow ^3P_2$ $2p_9 \rightarrow 1s_5$	$4p^2[5/2]_3 \rightarrow 4s^2[3/2]_2$
15	826.452	826.4	826.4	$^3P_1 \rightarrow ^1P_1$ $2p_2 \rightarrow 1s_2$	$4p^2[1/2]_1 \rightarrow 4s^2[1/2]_1$
16	840.821	840.7	840.7	$^3P_2 \rightarrow ^1P_1$ $2p_3 \rightarrow 1s_2$	$4p^2[3/2]_2 \rightarrow 4s^2[1/2]_1$
17	842,465	842.4	842.4	$^3D_2 \rightarrow ^3P_1$ $2p_8 \rightarrow 1s_4$	$4p^2[5/2]_2 \rightarrow 4s^2[3/2]_1$
18	852.144	851.9	851.9	$^3P_1 \rightarrow ^1P_1$ $2p_4 \rightarrow 1s_2$	$4p^2[3/2]_1 \rightarrow 4s^2[1/2]_1$

IV. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В дуговом разряде рассматриваемой модели ДЭТМД давление насыщенных паров вольфрама на четыре порядка меньше давления аргона. Поэтому аргон оказывает определяющее влияние на дрейфовую скорость электронов V_d и на теплопроводность плазмы, а роль вольфрама с малым потенциалом ионизации ($E_w = 7.98$ эВ) сводится к формированию концентрации n_e и температуры T_e электронов.

Согласно приведенным расчетам, плазма разряда электротермического микродвигателя представляет собой многокомпонентную аргоно-вольфрамовую плазму, имеющую несколько локальных температур.

Концентрация аргона много больше концентрации паров вольфрама и электронной концентрации, поэтому ширина контура излучения могла бы определяться, в основном, упругими столкновениями атомов аргона между собой и с электронами. Однако проведенные расчеты электронной температуры на основании ударного уширения контуров излучения атомов аргона в диапазоне 696...852 нм не позволяют однозначно утверждать об ударном возбуждении атомов тяжелых частиц рассматриваемой плазмы.

Линии излучения вольфрама обеспечивают белое свечение разряда, наблюдаемое через апертуру. Появление атомов вольфрама в объеме плазмы, с одной стороны, не является неожиданным, так как вольфрам входит в состав деталей конструкции, но, с другой стороны, является сигналом о происходящей эрозии конструктивных элементов [12].

В то же время наблюдается сильное поглощение длинноволнового крыла контура интенсивной линии вольфрама при $\lambda = 465.987$ нм. Если этот эффект определяется самопоглощением, то по параметрам «хвоста» этой

линии (при $\lambda = 465.2$ нм), регистрируемого через сопло двигателя, можно оценить расход вольфрама. Вероятно, отсутствие в спектре сопла линий вольфрама при $\lambda = 489.2$ нм, 513.0 нм и 546.9 нм также можно объяснить самопоглощением.

Было замечено, что спектр аргона, прошедшего через апертуру, утратил несколько линий: $\lambda = 714.704$ нм, 727.294 нм, 866.794 нм, 912.296 нм, 922.450 нм. Этому явлению было дано объяснение в [11] большой скоростью тушения возбужденных состояний аргона молекулами азота из окружающей сопло воздушной среды.

При сравнении длин волн линий аргона $\lambda = 794.815$ нм, 800.616 нм и 810.369 нм (табл. 2) по излучению из сопла относительно излучения из разрядной камеры видно, что линии имеют доплеровский сдвиг длин волн.

Подтверждение этому сдвигу находим в том, что скорости атомов аргона в камере направлены более хаотично, чем в струе газа, направленной из сопла, преимущественно с осевой скоростью.

V. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Плазма разряда модели электродугового микродвигателя представляет собой многокомпонентную аргоно-вольфрамовую плазму, имеющую несколько локальных температур.

Спектр свечения разряда, наблюдаемый через апертуру разрядной камеры, является следствием возбуждения атомов вольфрама и аргона. В спектре, наблюдаемом через сопло разрядной камеры, обнаружено сильное поглощение длинноволнового крыла контура интенсивной линии вольфрама при $\lambda = 465.987$ нм. Регистрация частичного самопоглощения этой линии вольфрама, наблюдаемой через сопло двигателя, позволяет оценить величину происходящей эрозии конструктивных элементов плазменного устройства.

При рассматриваемом режиме возбуждения модели ДЭТМД в разряде между спектральными линиями атомов аргона при $\lambda = 794.815$ нм, 800.616 нм и 810.369 нм зарегистрировано смещение при прохождении излучения через сопло разрядной камеры. Отмеченный сдвиг, согласно эффекту Доплера, может быть использован для нахождения скорости истечения струи газа.

Для более полного представления механизмов возбуждения разряда ДЭТМД необходимо проведение дополнительных исследований.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 15-08-00726.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mazouffre S. Electric propulsion for satellites and spacecraft: established technologies and novel approaches // *Plasma Sources Sci. Technol.* 25 (2016) P. 1–27.
2. Ельяшевич М. А. Атомная и молекулярная спектроскопия. М.: Гос. изд-во физ.-мат. Лит, 1962. 892 с.
3. Brinkman E. A. Electron densities and temperatures // *J. Appl. Phys.* 81 (3). February 1997. P. 1093–1098.
4. Bijie Yang, Quanhua Sun. Numerical Analysis of the Plasma Flow in an Arcjet Thruster // *AIP Conference Proceedings*. 2014. Vol. 1628. P. 1132–1138.
5. Ландау Л. Д., Лившиц Е. М. Теоретическая физика: учеб. пособие. Т. VI. Гидродинамика. М.: Наука, 1988. 736 с.
6. Blinov Viktor N., Ruban Viktor I., Shalay Viktor V., Lykyanchik Anton I., Vavilov Igor S., Yachmenev Pavel S., Kositsin Valery V., Mironov Iuri M. Design features and experimental researches of an arcjet thruster for small satellite // *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics)*. 2016. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7818983.
7. Смирнов Б. М. Моделирование газоразрядной плазмы // *Успехи физических наук*. Т. 179, № 6. 2009. С. 591–604.
8. Розбери Ф. Справочник по вакуумной технике и технологии / Пер. с англ. М.: Энергия, 1972. 456 с.
9. Фриш С. Э. Оптические спектры атомов. М.–Л.: ГИФ-МЛ, 1963. 262 с.
10. Таблицы спектральных линий: справочник. М.: Наука, Главная редакция физ.-мат. лит.-ры, 1977. 800 с.
11. Cullen P. J., Milosavljevic V. Spectroscopic characterization of a radio-frequency argon plasma jet discharge in ambient air // *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2015. Vol. 6. 063J01. 17 p.
12. Смирнов Ю. М. Сечения возбуждения атома вольфрама электронным ударом // *Теплофизика высоких температур*. 2009. Т. 47, № 1. С. 17–25.