

# ОЦЕНКА ЭРОЗИИ ВОЛЬФРАМОВЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО МИКРОДВИГАТЕЛЯ СПЕКТРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

В. И. Горбунков, В. В. Шалай

Омский государственный технический университет,  
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

**Оценка эрозии вольфрамовых электродов электротермического микродвигателя, работающего на постоянном токе, произведена с применением методов кинетической теории газов на примере аргона, взятого в качестве технологического плазмообразующего газа.**

**Предложен подход к определению газовой температуры электродугового микродвигателя и максимальной скорости истечения газов, позволяющий оценить массовый расход вольфрама за счет эрозии.**

**Ключевые слова:** аргоновая плазма высокого давления, газовая температура, эрозия вольфрамовых электродов, распределение Больцмана, эмиссионная спектроскопия, электродуговой микродвигатель.

## Введение

Известны две функционально одинаковые конструкции плазменных установок одинаково подверженных электродной эмиссии, нарушающей стабильность их работы: конструкции электротермических микродвигателей (ЭТМД) и устройств для плазменного напыления. Актуальная проблема первых заключается в достижении стабильных разрядов в составе рабочего газа (рабочего тела) с быстрым запуском и отключением тяги, а также уменьшением эрозии электродов, связанных с фазой зажигания. Проблема вторых также касается дуговой нестабильности, приводящей к неоднородности плазменного напыления. Осаждение нанодисперсных частиц осуществляется в потоке разреженного инертного газа, чаще всего аргона, либо в потоке при атмосферном давлении.

Плазменное напыление считается «зрелой технологией», так как широко используется во многих отраслях науки и техники, включая авиацию и теплоэнергетику, автомобильную промышленность, добычу и переработку сырья, биомедицину и электронику [1].

Режим работы дуги подвержен влиянию тепловых, электромагнитных, гидродинамических, химических и оптических процессов, взаимодействия между которыми еще недостаточно изучены. Размер частиц зависит от вида инертного газа, температуры, способа нагревания, вида испаряемого материала, расстояния от нагревателя до стенок камеры [2–4]. Плазменные горелки этого типа используются в составе ЭТМД [5]. Основанием такого сравнения являются одинаковые конструктивные и функциональные признаки, к которым можно отнести: замкнутый тип разрядной камеры; подачу одноатомного (многоатомного) газа высокого давления, в котором формируется плазменная струя, исходящая из

сопла; вращательное движение дуги в плоскости, перпендикулярной оси сопла-анода; использование вольфрамовых электродов; адиабатическое расширение газа; склонность к термическому равновесию.

Отличительной особенностью замкнутых объемов небольшого размера, занимаемых плазмой и обтекаемых газом, является то, что стенки нагреты до определенной температуры. Частицы вещества испускают и поглощают фотоны, в большей или меньшей степени может устанавливаться равновесие между частицами вещества и излучением [6]. Утверждение об адиабатическом характере процесса сжатия за счет роста температуры находит подтверждение в изменении его спектрального состава и эффекте Доплера [7].

Картина эрозии электродов, наблюдаемая на ЭТМД, выражается в количественном соотношении и является важной для проведения оценки этого процесса в горелках для плазменного напыления при близких внешних условиях [5, 8].

Применение эмиссионной спектроскопии для оценки эрозии электродов является перспективным, так как появление атомов вольфрама в объеме плазмы является сигналом о разрушении конструктивных элементов микродвигателей, с одной стороны, и позволяет производить оценку расхода вольфрама — с другой. В [9] по сильному поглощению длинноволнового крыла контура интенсивной линии при  $\lambda_w = 465,987$  нм, регистрируемого через сопло двигателя, предложена оценка расхода вольфрама. Эмиссионная спектроскопия считается перспективной и при плазменном напылении для анализа явлений, наблюдаемых при осаждении материала, впрыскиваемого в плазменную струю [3].

Температура в камере является важнейшим конструктивным параметром, связанным с фотохимическими процессами плазмы дугового разряда, методы ее определения основаны на при-

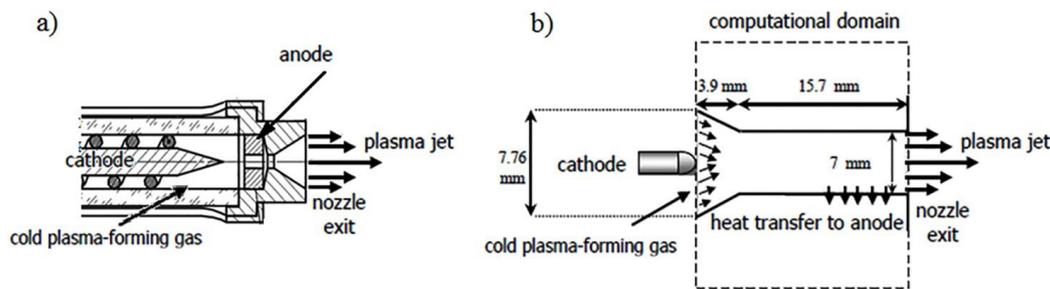


Рис. 1. Фрагмент действующей модели ЭТМД [8] а) и схема типовой DC дуговой горелки для плазменного напыления [2] б)  
 Fig. 1. A fragment of the current model of ETMD [8] а) a schematic of a typical DC arc plasma torch [2] б)

менении кинетической теории газов, поскольку непосредственная регистрация температуры, например зондовыми методами, затруднительна и ссылки на них в литературе либо отсутствуют [10], либо упоминаются лишь косвенно [11].

Перспективно рассмотрение возможности установления бoльцмановского распределения населенностей возбужденных уровней с точки зрения приближения к локальному термическому равновесию. Например, оценка населенности метастабильных состояний в аргоновой плазме при исследовании неравновесных состояний [12] позволила впервые обнаружить инверсную заселенность на одном из переходов аргона ArI. Представляет также большой практический интерес исследование роли температуры распределения в кинетике аргоновой плазмы в разрядной камере. Для нахождения эффективной скорости истечения плазмообразующего газа представляет интерес равновесная температура газа в камере электротермического микродвигателя, подверженного адиабатическому воздействию. Для этого воспользуемся спектральными характеристиками излучения плазмы ЭТМД.

### Описание экспериментальной установки

Исследования проводились с использованием действующей установки ЭТМД, схема которой приведена на рис. 1а. На рис. 1б показана схема необслуживаемой плазменной горелки.

Полное описание исследуемой модели дугового электротермического микродвигателя приведено в [9]. Межэлектродное расстояние между катодом и кромкой кольцевого анода составляет 3–5 мм. Материал электродов — вольфрам. Рабочий газ аргон подавался в полость через завихритель под давлением  $(1,03 - 1,08) \times 101,3 \times 10^3$  Па.

Питание осуществлялось стабилизированным блоком питания. Ток разряда измерялся шунтом сопротивлением 1 Ом, а напряжение на разряде с помощью омического делителя 11,9/43,8 кОм с помощью осциллографа «RIGOLDS2202». Конструкция блока питания разряда предусматривала регулировку напряжения, поэтому оценка параметров разряда была проведена при токе  $I_R = 3,0$  А и соответствующем падении напряжения  $U_R = 19,0$  В.

Спектральные измерения проводились с помощью пятиканального модульного калиброван-

ного радиометрического комплекса «Ava-Spec-ULS204L-5-RM», спектральный диапазон которого составлял 235–815 нм, оптическое разрешение 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 осевого излучения разряда через сопло модели ЭТМД, а также мог быть зарегистрирован через стенку кварцевой трубки под углом  $90^\circ$  к оси микродвигателя [9]. Расстояние между срезом сопла и коллимационной линзой составляло 170 мм. Оптические измерения проводились после выхода модели электротермического микродвигателя в стационарный режим работы за единовременный сеанс регистрации всего спектра.

Температура помещения лаборатории составляла  $20^\circ\text{C}$ .

### Основные положения теории

Интенсивность спектральных линий. Под интенсивностью линий понимаем величину, пропорциональную мощности излучения единицы объема [13]. При одновременном отсутствии равновесия с излучением, когда самопоглощение не играет заметной роли, отношение концентраций возбужденных атомов определяется не только отношением вероятностей переходов  $A_{ki}$  и частот линий  $\nu_{ki}$ , но и отношением интенсивностей  $I_{ki}$ :

$$\frac{N_l}{N_k} = \frac{I_{lk}}{I_{ki}} \cdot \frac{A_{ki}}{A_{lk}} \cdot \frac{\nu_{ki}}{\nu_{lk}} \quad (1)$$

Так как в зависимости от условий возбуждения заселенность верхних уровней может оказаться различной, то и отношение  $N_l/N_k$  может принимать различные значения, в том числе и равновесного заселения уровней  $l$  и  $k$ , удовлетворяющего закону Больцмана

$$\frac{N_l}{N_k} = \frac{g_l}{g_k} \cdot e^{-\frac{E_l - E_k}{k_B T}} \quad (2)$$

Таблица 1. Экспериментальные значения концентрации верхних уровней аргона в камере ЭТМД [9]  
Table 1. Experimental data regarding upper levels argon atoms concentration in the registerjet chamber [9]

Энергия уровня, эВ	$N_B$ , см <sup>-3</sup> концентрация по Больцману при $T = 6850$ К	$N_{cp}$ , см <sup>-3</sup>	Расхождение $N_{cp} - N_B$	Погрешность измерений, %
12,906	2,37E+10	1,47E+10	38,0 %	
13,07	4,15E+10	6,14 E+10	32,4 %	
13,09	2,87E+10	8,13E+10	64,6 %	±34
13,15	1,55E+10	3,85E+10	58,0 %	±15
13,169	2,5E+10	9,2E+09	63,2 %	±24
13,27	4,23E+09	3,50E+09	17,2 %	±40
13,28	1,25E+10	1,00E+10	19,7 %	±35
13,30	2,01E+10	2,06E+10	2,4 %	±12
13,330	1,15E+10	1,25E+10	8,0 %	±28
13,480	2,96E+09	2,90E+09	0,7 %	±0,7

где  $k_B$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура распределения,  $g_{i,k}$  — статистический вес уровня  $l, k$ .

Полученное из (2) выражение

$$T = \frac{h\nu_{lk}}{k_B \ln \frac{N_k}{N_l}} \quad (3)$$

позволяет оценить по отношению интенсивностей выбранных спектральных линий локальную температуру газоразрядной плазмы [14].

Известно выражение для эффективной скорости истечения плазмообразующего газа, определяющее предел идеальной скорости истечения продуктов разложения в зависимости от температуры при бесконечном расширении газа

$$W_{max} = \sqrt{2 \frac{\gamma}{\gamma - 1} \cdot \frac{R \cdot T_\gamma}{M}}, \quad (4)$$

где  $\gamma$  — показатель ударной адиабаты рабочего тела;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $M$  — молярная масса рабочего тела;  $T_\gamma$  — температура газа в разрядной камере. Эффективная скорость истечения определяет потенциальные возможности плазмообразующего газа, так как максимальная теоретически достижимая величина скорости истечения определяется его физическими свойствами безотносительно к условиям применения [15]. В соответствии с найденной температурой  $T_\gamma$  определяется максимальная теоретически достижимая скорость истечения аргона в камере ЭТМД. Полученное значение температуры позволяет определить соответствующую скорость звука

$$C_0 = \sqrt{\gamma \cdot \frac{R \cdot T_\gamma}{M}}. \quad (5)$$

Принимая во внимание, что концентрация паров вольфрама в камере известна и существен-

но меньше концентрации аргона, можем сделать предположение о равенстве осевых скоростей истечения продуктов разложения. Это позволяет на примере аргоно-вольфрамовой плазмы по величине скорости производить оценку массового расхода вольфрама.

**Параметры многокомпонентной плазмы ЭТМД** [14]. Оценка температуры плазмы рабочего газа аргона в камере дугового ЭТМД производилась при рабочих параметрах блока питания и сечения  $S_R$  положительного столба разряда диаметром  $d = 0,5 - 1,0$  мм. Полученная плотность тока  $j = I_R / S_R = (382,2...1530,6)$  А/см<sup>2</sup> позволила оценить величину электронной концентрации в дуговом разряде. Дрейфовая скорость электронов  $V_d$  была найдена из соображения, что электроны в газовом промежутке  $L_e = 0,3...0,5$  см движутся в атмосфере аргона, концентрация которого  $N_{Ar} = P_{Ar} / kT = 2,45 \times 10^{19}$  см<sup>-3</sup>. Принимая во внимание зависимость дрейфовой скорости электронов в аргоне  $V_d = (1,90...2,15) \times 10^5$  см·с<sup>-1</sup>, по плотности тока дугового разряда  $j = en_e V_d = (382,2...1530,6)$  А/см<sup>2</sup> проведена оценка электронной концентрации  $n_e = (1,2...4,8) \times 10^{15}$  см<sup>-3</sup>. Поток заряженных частиц нагревает электроды до весьма высокой температуры и, судя по эрозии катода и регистрируемому богатому эмиссионному спектру вольфрама [9], достигает температуры плавления  $T_w \approx 3700$  К [16]. Концентрация паров вольфрама, соответствующая давлению  $p_w = 5 \times 10^{-2}$  мм рт. ст. (6,67 Па) при  $T_w = 3655$  К, составляет  $N_w \approx 1,32 \times 10^{14}$  см<sup>-3</sup>, величину, существенно низкую, по отношению к концентрации аргона.

**Аргон. Линии переходов.** Аргон относится к инертным газам, спектр его атомов (табл. 1) хорошо известен [17–19]. Все заметные спектральные линии излучения из сопла ЭТМД, принадлежащие диапазону 690...850 нм, были идентифицированы по [19].

**Вольфрам. Линии переходов.** При регистрации спектра излучения ЭТМД отчетливо виден ряд спектральных линий в видимом диапазоне (462...547) нм, которые принадлежат атомам воль-

Таблица 2. Экспериментальные данные о некоторых уровнях концентрации атомов вольфрама в струйной камере [9]  
Table 2. Experimental data regarding some levels tungsten atoms concentration in the registerjet chamber [9]

№	$\lambda_{\text{лаб}}$ , нм [10]	$\lambda_1$ , нм (апертура)	$\lambda_2$ , 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	

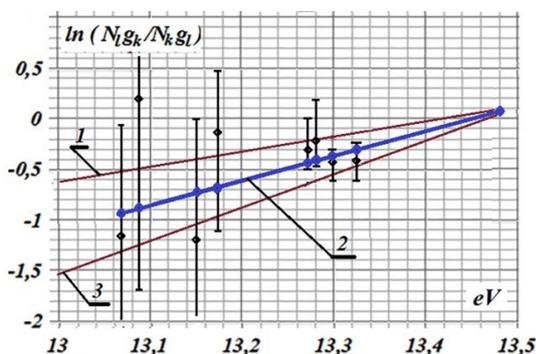


Рис. 2. Отношение  $-(E_l - E_k)/(k_B T)$  для девяти верхних уровней аргона при  $T = 6725$  К (линия 2),

1, 3 — пределы изменения угла наклона

Fig. 2. Experimental results  $\text{tg} \varphi = -(k_B T)^{-1}$  expression for nine upper argon levels (2) — line with  $T = 6725$  К, 1, 3 — tilt angle charging limits

фрама. В табл. 2 для сравнения даны интенсивности линий излучения, зарегистрированные через апертуру и сопло микродвигателя [9].

### Результаты измерений

Восстановленная по среднему значению выборки [20] концентрация метастабильного уровня атома аргона по линиям: 696,543 нм, 706,722 нм, 714,704 нм, 763,511 нм, 772,376 нм, 801,479 нм и 811,531 нм показала существенное (от 70% до 100%) отклонение плотности атомов аргона от равновесной концентрации в состоянии  $l_{55}$  при  $T \sim 6850$  К.

Полученный вывод оказался вполне естественным, поскольку основными кинетическими процессами уровней  $2p$  аргона является электронно-ударное возбуждение от уровней  $1s$ . Когда электронная плотность превышает  $10^{17}$  см $^{-3}$ , электронное воздействие является доминирующим процессом выравнивания населенности, в результате чего уровни  $2p$  имеют больцмановское распределение заселенности, а плотности  $2p_2$  и  $2p_3$  близки из-за равных по величине электронных ударов. Когда электронная плотность мала (близка  $10^{11}$  см $^{-3}$ ) доминирующим процессом распределения заселенности становятся межатомные столкновения, в результате кото-

рых выравнивание заселенности наблюдается у более низких уровней, например,  $2p_9$ . Обобщая полученные результаты, можно утверждать, что в исследуемом нами случае при  $n_e \approx 10^{15}$  см $^{-3}$  спектральные линии при  $\lambda = 750$  нм создаются под действием прямого электронного возбуждения из основного состояния, а возбуждение линии при  $\lambda = 811$  нм чувствительно к электронам с низкой энергией, концентрация которых оказалась низкой. Поэтому при оценке температуры нам приходится ограничиваться оценками верхних пяти уровней.

Согласно (2) и общей характеристике наблюдений был найден уточненный термодинамический параметр — температура распределения. Ее значение  $T = 6725 \pm 740$  К можно считать локальной газовой температурой аргона в камере дугового электродвигателя. Величина этой температуры характеризует тепловую (кинетическую) энергию атомов аргона. Для более наглядного представления экспериментальных данных больцмановскому распределению выражение (2) представим в логарифмическом виде

$$-\frac{E_l - E_k}{k_B T} = \ln \left( \frac{N_l / g_l}{N_k / g_k} \right),$$

где левая часть при фиксированном значении  $E_l$  и параметра  $T$  представляет собой прямую с  $\text{tg} \varphi = -(k_B T)^{-1}$ , а правая часть — отношение числа атомов, приходящееся на одно состояние различных уровней.

Как видно из рис. 2, пределы изменения угла наклона не выходят за нижние пределы групп атомов уровней 13,27...13,28 эВ и верхние пределы групп 13,0...13,33 эВ.

В нашем случае угол ее наклона находится в пределах зоны, определенной границами погрешности измерений заселенности уровней  $N_k$ . Наклонные линии (1, 3) (рис. 2), проходящие в пределах допустимых погрешностей измерения  $N_k$  определяют пределы изменения угла наклона с  $\text{tg} \varphi = -(k_B T)^{-1}$ , следовательно, пределы изменения параметра  $T$ . Среднее значение этого параметра дает оценку температуры распределения. В пределах погрешности измерений концентраций (табл. 2) осуществляется оценка величины параметра  $T$ .

### Обсуждение результатов

Согласно (3) и сводной характеристике наблюдений (табл. 2) был найден уточненный термодинамический параметр  $T$  — температура распределения заселенности уровней аргона. Ее значение  $T = 6725$  К можно считать локальной температурой газовой среды в камере ЭТМД. Величина этой температуры характеризует тепловую (кинетическую) энергию атомов и ионов аргона. При сравнении с дуговым разрядом в неподвижном потоке аргона [9] найденная величина  $T_r = 6725$  К существенно превышает значение локальной ионной температуры аргона, но приближается к величине электронной температуры.

В соответствии с полученной температурой  $T_r = 6725$  К максимальная теоретически до-

стижимая скорость истечения аргона в камере ЭТМД приблизительно равна  $W_{max} = 2,64$  км/с. Найденное значение температуры позволило, согласно (5), определить соответствующую скорость звука  $C_0 = 1520$  м/с. Полагая, что ионы и молекулы вольфрама входят в состав аргоновой плазмы, наряду с ней и обладают равной с ней линейной скоростью и температурой, максимальный массовый расход вольфрама определяется полученной величиной  $W_{max}$ , как  $G = 5 \times 10^{-3} \text{ гс}^{-1}$ .

### Выводы

Методами эмиссионной спектроскопии в приближении частичного локального термического равновесия найдено значение температуры  $T = 6725 \pm 740$  К рабочего газа аргона в камере дугового электротермического микродвигателя. Аргон подавался под давлением  $(1,03 - 1,08) \times 101,3 \times 10^3$  Па, оценка параметров разряда проведена при токе  $I_r = 3,0$  А и падении напряжения  $U_r = 19,0$  В. Спектральные измерения проводились с помощью спектрографа «Ava-Spec-ULS204L-5-RM», расстояние между срезом сопла и коллимационной линзой составляло 420 мм. Найденное значение температуры рабочего газа позволило оценить эффективную скорость истечения  $W_{max} = 2,64$  км/с аргона в камере ЭТМД и массовый расход вольфрама.

Для более полного представления механизмов массового расхода вольфрама за счет эрозии необходимо проведение дополнительных исследований ЭТМД, касающихся резонансных режимов, известных в катодных полостях устройств плазменного напыления.

### Список источников

1. Vardelle A., Moreau C., Themelis N. [et al.]. A Perspective on Plasma Spray Technology // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2015. Vol. 35, Issue 3. P. 491–509. DOI: 10.1007/s11090-014-9600-y.
2. Baudry C., Vardelle A., Mariaux G. [et al.]. Three-dimensional and time-dependent model of the dynamic behavior of the arc in a plasma spray torch // Thermal Spray 2004. Advances in Technology and Application, 10–12 May 2004. Osaka, Japan. Proceedings of the International Thermal Spray Conference. 2004. P. 745–755.
3. Krowka J., Rat V., Chazelas C. [et al.]. Suspension phased-injection in self-sustained pulsed arc jet. 87068. URL: <https://gd2014.sciencesconf.org/27471/document> (дата обращения: 15.03.2019).
4. Gardon M, Guilemany J. M. Milestones in Functional Titanium Dioxide Thermal Spray Coatings: A Review // Journal of Thermal Spray Technology. 2014. Vol. 23 (4). P. 577–595.
5. Yamada T., Iwamoto Y., Ogiwara K. [et al.]. Intermittent Operation of a Low Power Arc jet // IEP-93-083. P. 772–778.
6. Ельяшевич М. А. Спектроскопия атомов и молекул. М.: Физматгиз, 1962. 892 с.
7. Landau L. D., Lifshitz E. M. Fluid Mechanics. Vol. 6. Course of Theoretical Physics. Pergamon Press. 1959. 512 p.
8. Blinov V. N., Ruban V. I., Shalay V. V. [et al.]. Design features and experimental researches of an arcjet thruster for small satellite // IEEE Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 2016. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7818983.
9. Gorbunkov V. I., Kositsin V. V., Ruban V. I., Shalay V. V. Multicomponent arcjet plasma parameters // IOP Conference

Series: Journal of Physics. 2018. Vol. 944. 0120140. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012040.

10. Mazouffre S. Electric propulsion for satellites and spacecraft: established technologies and novel approaches // Plasma Sources Science and Technology. 2016. Vol. 25 (3). P. 1–27. DOI: 10.1088/0963-0252/25/3/033002.
11. Brinkman E. A. Electron densities and temperatures // Journal of Applied Physics. 1997. Vol. 81 (3). P. 1093–1098.
12. Bykova N. G., Zabelinskii I. E., Ibragimova L. B. [et al.]. Excitation and emission of argon behind the front of shock waves at speeds of 4.5–7.8 km/s. I. Experiment // Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics. 2017. Vol. 18 (1). P. 1–12.
13. Фриш С. Э. Оптические спектры атомов. М.: Наука, 1963. 640 с.
14. Горбунков В. И., Косицын В. В., Рубан В. И., Шалай В. В. Оценка температуры плазмы дугового разряда электротермического микродвигателя. // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2018. Т. 2, № 3. С. 44–50. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-3-44-50.
15. Беляев Н. М., Белик Н. П., Уваров Е. И. Реактивные системы управления космических летательных аппаратов / под ред. Н. М. Беляева М.: Машиностроение, 1979. 232 с.
16. Rosebury F. Handbook of electron tube and vacuum techniques. Springer, 1997. 620 p. ISBN 1563961210.
17. Cullen P. J., Milosavljević V. Spectroscopic characterization of a radio-frequency argon plasma jet discharge in ambient air // Progress of Theoretical and Experimental Physics. 2015. Vol. 2015 (6). 17 p. DOI: 10.1093/ptep/ptv070.
18. Smirnov B. M. Theory of gas discharge plasma // Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics. 2015. Vol. 84. 423 p. ISBN 978-3-319-11065-3.
19. Zaydel' A. N., Prokof'yev V. K., Rayskiy S. M. [et al.]. Tables of spectral lines. Springer Science: Business Media. NY, 1970. 782 p. DOI: 10.1007/978-1-4757-1601-6.
20. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. М.: Физматгиз, 1962. 349 с.

**ГОРБУНКОВ Владимир Иванович**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Теоретическая и общая электротехника».

SPIN-код: 2858-6763, AuthorID (РИНЦ): 601948

ORCID: 0000-0002-5495-5641

AuthorID (SCOPUS): 36954424000

ResearcherID: Q-5370-2016

**ШАЛАЙ Виктор Владимирович**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология», президент ОмГТУ.

SPIN-код: 2322-6820; AuthorID (РИНЦ): 9913

ORCID: 0000-0003-0635-4849

AuthorID (SCOPUS): 35792469000

AuthorID (SCOPUS): 56755298300

AuthorID (SCOPUS): 57190972363

ResearcherID: P-8233-2015

### Для цитирования

Горбунков В. И., Шалай В. В. Оценка эрозии вольфрамовых электродов электротермического микродвигателя спектрально-оптическим методом // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2019. Т. 3, № 2. С. 143–149. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-2-143-149.

Статья поступила в редакцию 25.04.2019 г.

© В. И. Горбунков, В. В. Шалай

## OPTIC EVALUATION OF EROSION ARCJET TUNGSTEN ELECTRODES

V. I. Gorbunkov, V. V. Shalay

Omsk State Technical University,  
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

**The kinetic theory of gases methods has been used to evaluate the erosion DC arcjet tungsten electrodes. Argon is chosen as the process plasma gas. Estimation of the mass flow rate of tungsten due to erosion is performed as a result of determining the gas temperature and the maximum flow rate of arcjet gases.**

**Keywords: high-pressure argon plasma, gas temperature, erosion of tungsten electrodes, Boltzmann distribution, emission spectroscopy, arcjet thruster.**

### References

1. Vardelle A., Moreau C., Themelis N. [et al.]. A Perspective on Plasma Spray Technology // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2015. Vol. 35, Issue 3. P. 491–509. DOI: 10.1007/s11090-014-9600-y. (In Engl.).
2. Baudry C., Vardelle A., Mariaux G. [et al.]. Three-dimensional and time-dependent model of the dynamic behavior of the arc in a plasma spray torch // Thermal Spray 2004. Advances in Technology and Application, 10–12 May 2004. Osaka, Japan. Proceedings of the International Thermal Spray Conference. 2004. P. 745–755. (In Engl.).
3. Krowka J., Rat V., Chazelas C. [et al.]. Suspension phased-injection in self-sustained pulsed arc jet. 87068. URL: <https://gd2014.sciencesconf.org/27471/document> (accessed: 15.03.2019). (In Engl.).
4. Gardon M, Guilemany J. M. Milestones in Functional Titanium Dioxide Thermal Spray Coatings: A Review // Journal of Thermal Spray Technology. 2014. Vol. 23 (4). P. 577–595. (In Engl.).
5. Yamada T., Iwamoto Y., Ogiwara K. [et al.]. Intermittent Operation of a Low Power Arcjet // IEPC-93-083. P. 772–778. (In Engl.).
6. El'yashevich M. A. Spektroskopiya atomov i molekul [Spectroscopy of atoms and molecules]. Moscow: Fizmatgiz Publ., 1962. 892 p. (In Russ.).
7. Landau L. D., Lifshitz E. M. Fluid Mechanics. Vol. 6. Course of Theoretical Physics. Pergamon Press. 1959. 512 p. (In Engl.).
8. Blinov V. N., Ruban V. I., Shalay V. V. [et al.]. Design features and experimental researches of an arcjet thruster for small satellite // IEEE Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 2016. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7818983. (In Engl.).
9. Gorbunkov V. I., Kositsin V. V., Ruban V. I., Shalay V. V. Multicomponent arcjet plasma parameters // IOP Conference Series: Journal of Physics. 2018. Vol. 944. 0120140. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012040. (In Engl.).
10. Mazouffre S. Electric propulsion for satellites and spacecraft: established technologies and novel approaches // Plasma Sources Science and Technology. 2016. Vol. 25 (3). P. 1–27. DOI: 10.1088/0963-0252/25/3/033002. (In Engl.).
11. Brinkman E. A. Electron densities and temperatures // Journal of Applied Physics. 1997. Vol. 81 (3). P. 1093–1098. (In Engl.).
12. Bykova N. G., Zabelinskii I. E., Ibraguimova L. B. [et al.]. Excitation and emission of argon behind the front of shock waves at speeds of 4.5–7.8 km/s. I. Experiment // Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics. 2017. Vol. 18 (1). P. 1–12. (In Engl.).
13. Frish S. E. Opticheskiye spektry atomov [Optical spectra of atoms]. Moscow: Nauka Publ., 1963. 640 p. (In Russ.).
14. Gorbunkov V. I., Kositsin V. V., Ruban V. I., Shalay V. V. Otsenka temperatury plazmy dugovogo razryada elektrotermicheskogo mikrovdvigatelya [Arcjet plasma temperature estimation in thruster device] // Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2018. Vol. 2, no. 3. P. 44–50. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-3-44-50. (In Russ.).
15. Belyayev N. M., Belik N. P., Uvarov E. I. Reaktivnyye sistemy upravleniya kosmicheskikh letatel'nykh apparatov [Jet control systems for spacecraft] / Ed. N. M. Belyayev. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1979. 232 p. (In Russ.).
16. Rosebury F. Handbook of electron tube and vacuum techniques. Springer, 1997. 620 p. ISBN 1563961210. (In Engl.).
17. Cullen P. J., Milosavljević V. Spectroscopic characterization of a radio-frequency argon plasma jet discharge in ambient air // Progress of Theoretical and Experimental Physics. 2015. Vol. 2015 (6). 17 p. DOI: 10.1093/ptep/ptv070. (In Engl.).
18. Smirnov B. M. Theory of gas discharge plasma // Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics. 2015. Vol. 84. 423 p. ISBN 978-3-319-11065-3. (In Engl.).
19. Zaydel' A. N., Prokof'yev V. K., Rayskiy S. M. [et al.]. Tables of spectral lines. Springer Science: Business Media. NY, 1970. 782 p. DOI: 10.1007/978-1-4757-1601-6. (In Engl.).
20. Linnik Yu. V. Metod naimen'shikh kvadratov i osnovy matematiko-statisticheskoy teorii obrabotki nablyudeniy [Least Squares Method and the Foundation of Theory for mathematical-statistical theory of processing observations]. Moscow: Fizmatgiz, 1962. 349 p. (In Engl.).

**GORBUNKOV Vladimir Ivanovich**, Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Associate Professor of Theoretical and General Electrical Engineering Department, Head of Photonics and Gas Discharges Spectroscopy Laboratory.

SPIN-code: 2858-6763  
AuthorID (RSCI): 601948  
ORCID: 0000-0002-5495-5641  
AuthorID (SCOPUS): 36954424000  
ResearcherID: Q-5370-2016

**SHALAY Viktor Vladimirovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Oil and Gas Engineering, Standardization and Metrology Department, President OmSTU.

SPIN-code: 2322-6820  
AuthorID (RSCI): 9913  
ORCID: 0000-0003-0635-4849  
AuthorID (SCOPUS): 35792469000  
AuthorID (SCOPUS): 56755298300

AuthorID (SCOPUS): 57190972363  
ResearcherID: P-8233-2015

Address for correspondence: vigorbunkov@list.ru

#### For citations

Gorbunkov V. I., Shalay V. V. Optic evaluation of erosion arcjet tungsten electrodes // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2019. Vol. 3, no. 2. P. 143 – 149. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-2-143-149.

Received 25 April 2019.

© V. I. Gorbunkov, V. V. Shalay