

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ ЭРОЗИИ УСКОРЯЮЩЕГО ЭЛЕКТРОДА ГАЗОРАЗРЯДНОГО ИСТОЧНИКА ИОНОВ

Духопельников Д.В.*, Воробьев Е.В.**

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2-я Бауманская ул., 5, Москва, 105005, Россия*

** e-mail: duh@bmstu.ru*

*** e-mail: evgsparrow@gmail.com*

Статья поступила в редакцию 09.10.2018

Описан способ определения профиля эрозии поверхности элементов электроракетных двигателей (ЭРД) и других газоразрядных приборов под действием распыления неоднородными ионными потоками с помощью многослойных покрытий из контрастных материалов. Показано, что при выборе структуры многослойных покрытий ключевым параметром при вычислении толщин отдельных слоев является угол выработки поверхности. Приведено теоретическое доказательство применимости выражения для угла выработки поверхности, полученного для массивного материала, для любого слоя многослойного покрытия произвольной структуры. Представленные результаты могут быть полезны при выборе оптимальных толщин слоев многослойных покрытий для ускоренного определения профиля эрозии поверхностей ионно-оптической системы ЭРД.

Ключевые слова: профиль эрозии, ионная бомбардировка, многослойные покрытия, ионно-оптическая система, ионные двигатели, ускоренные испытания.

Введение

Газоразрядные электростатические источники ионов нашли широкое применение в качестве электрических ракетных двигателей [1], используемых на современных космических аппаратах с длительным сроком активного существования [2, 3]. При разработке таких устройств всегда возникает необходимость экспериментального подтверждения их ресурса, который, как правило, ограничивается временем сквозного распыления ускоряющего электрода ионно-оптической системы ионами перезарядки [4]. Наиболее достоверным методом измерения ресурса ЭРД являются прямые ресурсные испытания [5, 6], требующие больших временных и материальных затрат. Поэтому большой интерес вызывают методики, позволяющие предсказать ресурс устройства на основе относительно коротких испытаний с последующей экстраполяцией результатов на весь срок службы. Подобные методики требуют теоретической и экспериментальной оценки профилей распределения плотности ионного тока в пучке [7, 8], а также скоростей эрозии элементов конструкции, находящихся под воздействием ионной бомбардировки.

Скорость эрозии поверхности под действием ионной бомбардировки может быть измерена напрямую по глубине выработки поверхности электрода за определенный промежуток времени. Для измерения глубины выработки могут использоваться контактные и оптические профилометры [9, 10]. Такие измерения дают наиболее достоверные результаты, однако для их проведения требуется непрерывная работа двигателя длительностью не менее нескольких сотен часов.

Существует ряд способов оценки скорости износа электродов ЭРД, основанных на определении концентрации продуктов эрозии (частиц материала электродов) в ионном пучке спектральными методами [11, 12]. Однако для их реализации необходимо сложное оптическое оборудование. Наиболее простыми с точки зрения материальных затрат являются расчетные методы [13, 14, 15] оценки ионных потоков. Но такие методы пока несовершенны и требуют экспериментальной проверки. При этом важно отметить, что экспериментальная отработка расчетных методик оценки скоростей эрозии должна проводиться в коротких, наименее затратных экспериментах.

Применение многослойных покрытий для измерения скорости эрозии

В работе [16] был впервые предложен способ диагностики скорости эрозии поверхности с помощью многослойных покрытий, позволяющий оценить скорость эрозии поверхности электрода по результатам эксперимента длительностью не более нескольких десятков часов. К исследуемой поверхности приваривались небольшие образцы-свидетели с нанесенным многослойным покрытием, состоящим из чередующихся слоев контрастных материалов. Скорость эрозии определялась по количеству распыленных слоев за время эксперимента. Недостатком описанного способа является сложность установки и демонтажа образцов свидетелей, а также невозможность построения карты распределения профиля эрозии электрода по поверхности.

В работах [17–20] многослойные покрытия наносились прямо на поверхность исследуемого электрода. При распылении образца с многослойным покрытием неоднородным ионным пучком скорости эрозии различных точек поверхности будут различаться. При достаточном времени воздействия в разных точках поверхности будет распылено различное количество слоев покрытия. В результате будет сформирована контрастная картина распыления, состоящая из чередующихся полос из разных материалов. При этом границы между соседними полосами будут линиями равной глубины выработки. Скорость эрозии и профиль выработки определяются при анализе изображений распыленной поверхности покрытия (рис. 1), после воздействия ионного пучка в течение определенного времени.

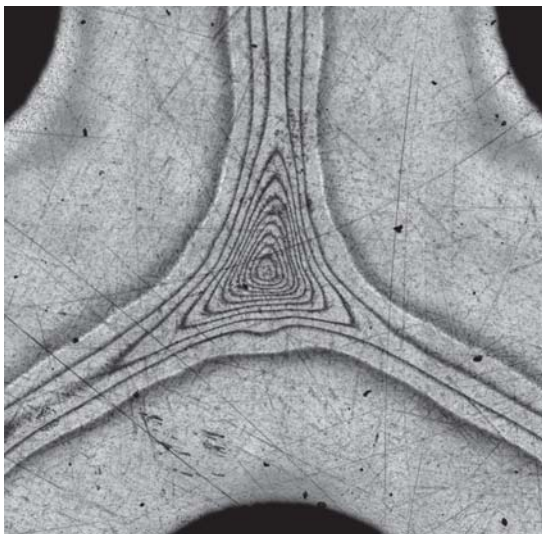


Рис. 1. Поверхность ускоряющего электрода электростатического ионного двигателя с многослойным покрытием после 14 часов работы

Глубина выработки при распылении поверхности ионным пучком определяется выражением:

$$h = \frac{M_a S_{\text{эф}}}{\rho} j t, \quad (1)$$

где M_a – атомная масса материала; ρ – плотность материала; $S_{\text{эф}}$ – усредненный по функции распределения ионов по энергиям коэффициент распыления; j – плотность ионного тока; t – время воздействия ионного потока.

При неоднородном распределении плотности ионного тока поверхность распыляется с уклоном в сторону увеличения плотности ионного тока. Угол наклона α определяется выражением:

$$\text{tg}(\alpha) = \frac{dh}{dx} = \frac{M_a S_{\text{эф}} t}{\rho} \frac{dj}{dx}, \quad (2)$$

где dj/dx – градиент плотности ионного тока в исследуемом направлении x .

Видимая ширина полосы на контрастной картине распыления зависит от толщины покрытия δ и угла α . С учетом выражения (2) для ширины полосы можно записать:

$$b_i = \frac{\delta_i}{\text{tg}(\alpha_i)} = \frac{\delta_i \rho_i}{M_{ai} S_{\text{эф}i} t} \frac{dj}{dx}, \quad (3)$$

где δ_i – толщина слоя для данной полосы.

При этом, как предполагается в работе [18], если толщины слоев из одинаковых материалов будут равны, то при одинаковом градиенте плотности ионного тока угол α и, следовательно, ширина полос будет одинакова. Для слоев из разных материалов при их одинаковой толщине, ширина полос будет различной.

На основании выражений (1) и (2) в работе [18] даются рекомендации по выбору соотношения толщин отдельных слоев покрытия. Например, для того чтобы при постоянном градиенте плотности ионного тока на картине распыления многослойного покрытия получить полосы одинаковой ширины для всех контрастных материалов, необходимо наносить слои с толщиной

$$\delta_i = A \cdot \frac{M_{ai} S_{\text{эф}i}}{\rho_i}, \quad (4)$$

где A – константа.

При выборе структуры многослойных покрытий для измерения профиля выработки поверхности вычисление толщин отдельных слоев производится по формуле (3) так, чтобы ширина видимых полос на изображении значительно превышала разрешающую способность системы фоторегистрации при любых возможных параметрах ионного пучка. В работе [18] выражения (2) и (3) для угла наклона поверхности получены для распыления однородного материала или распыления самого верхнего слоя покрытия, когда распыление в каждой точке поверхности начинается одновременно. При распылении многослойного покрытия неоднородным ионным пучком разные точки слоя, находящегося в глубине, начинают распыляться в разное время, поэтому возникает вопрос о корректности применения в этом случае выражения (2).

Угол выработки внутренних слоев покрытия

Рассмотрим многослойное покрытие, состоящее из произвольного числа слоев n с произвольной толщиной δ_i из произвольных материалов (рис. 2). Для каждого i -го слоя может быть определена величина, пропорциональная скорости распыления:

$$K_i = \frac{M_{ai} S_{\text{эф}i}}{e \rho_i}. \quad (5)$$

Пусть через время t в точке с координатой x будут распылены $n-1$ слоев и частично, на глуби-

ну δ'_n , распылен слой n . Тогда для каждого i -го слоя в точке x можно записать:

$$\frac{\delta_i}{K_i} = jt_i, \quad t_1 + t_2 + \dots + t_n = t, \quad (6)$$

где t_i – время сквозного травления i -го слоя в точке x ; t – полное время травления; j – плотность ионного тока в точке x .

В точке с координатой $x+dx$ при плотности тока $j+dj$ время, затраченное на травление i -го слоя, сократится на dt_i . Тогда, аналогично (6), для $n-1$ слоев запишем:

$$\frac{\delta_i}{K_i} = (j + dj)(t_i - dt_i). \quad (7)$$

Для слоя $i = n$ время травления увеличится на dt_n . Время травления последнего слоя в точке $x+dx$ станет больше на величину, равную сумме времен, на которые сократятся времена травления каждого предыдущего слоя:

$$dt_n = dt_1 + dt_2 + \dots + dt_{n-1}. \quad (8)$$

Для слоев $i = 1 \dots n - 1$, приравнявая правые части (6) и (7), получаем:

$$jt_i = (j + dj)(t_i - dt_i). \quad (9)$$

Преобразуя (9) и пренебрегая малым членом $djdt_i$, получаем выражение для сокращения времени сквозного травления слоев $i = 1 \dots (n - 1)$ в точке $x+dx$:

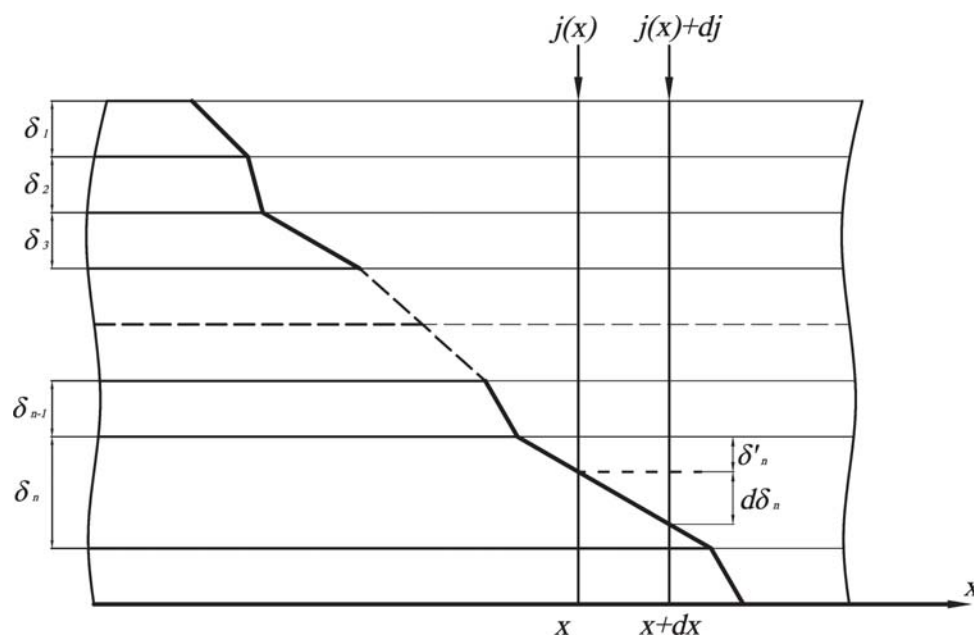


Рис. 2. Схема распыления многослойного покрытия неоднородным ионным пучком

$$dt_i = \frac{dj}{j} t_i. \quad (10)$$

Для слоя $i = n$ в точке с координатой $x+dx$ можно записать

$$\frac{\delta'_n + d\delta_n}{K_n} = \frac{\delta'_n}{K_n} + \frac{d\delta_n}{K_n} = (j + dj)(t_n + dt_n). \quad (11)$$

Преобразуем (11) с учетом выражения (6) для слоя $i = n$:

$$jt_n + \frac{d\delta_n}{K_n} = (j + dj)(t_n + dt_n). \quad (12)$$

Сокращая левую и правую части (12) на jt_n и пренебрегая малым членом $dj \cdot dt_n$, получаем:

$$\frac{d\delta_n}{K_n} = jdt_n + t_n dj. \quad (13)$$

С учетом (8) и (10) выражение (13) можно преобразовать:

$$\begin{aligned} \frac{d\delta_n}{K_n} &= j \sum_1^{n-1} dt_i + t_n dj = dj \sum_1^{n-1} t_i + t_n dj = \\ &= \left(\sum_1^{n-1} t_i + t_n \right) dj = tdj. \end{aligned} \quad (14)$$

Разделив левую и правую часть (14) на dx и перенося K_n в правую часть, получаем выражение, совпадающее с (2):

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{dS_n}{dx} = K_n t \frac{dj}{dx}. \quad (15)$$

Следовательно, полученные в [18] выражения (2), (3), (4) в частности и предложенная методика — в целом справедливы для любого слоя из любого материала, находящегося в глубине многослойного покрытия произвольной структуры.

Выводы

Приведенные результаты доказывают применимость описанного в работе [18] способа для многослойных покрытий произвольной структуры. При этом следует учитывать, что на точность определения угла выработки и профиля эрозии влияют погрешности нанесения или определения толщины отдельных слоев на всей исследуемой поверхности, а также точность определения эффективного коэффициента распыления материалов слоев. Следует отметить, что углы выработки покрытия крайне малы и не оказывают заметного влияния на коэффициент распыления в процессе выработки.

Обоснованная в работе методика определения профиля эрозии лежит в основе полноценной методики ускоренного прогнозирования ресурса элементов газоразрядных источников ионов.

Библиографический список

1. *Архинов А.С., Ким В.П., Сидоренко Е.К.* Стационарные плазменные двигатели Морозова. — М.: Изд-во МАИ, 2012. — 292 с.
2. *Обухов В.А., Покрышкин А.И., Попов Г.А., Яшина Н.В.* Использование маршевой электроракетной двигательной установки для управления ориентацией КА // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т. 16. № 3. С. 30-40.
3. *Обухов В.А., Покрышкин А.И., Попов Г.А., Яшина Н.В.* Управление движением и ориентацией космического аппарата на высокоэллиптической орбите // Вестник Московского авиационного института. 2007. Т. 14. № 4. С. 22-29.
4. *Goebel D.M. and Katz I.* Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters. — Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 2008. — 486 p.
5. *Polk J.* Overview of the USA Electric Propulsion Programs // 30th International Electric Propulsion Conference IEPC-2007-388, Villa Vittoria, Florence, Italy, 17-20 September, 2007.
6. *Wirz R.E., Anderson J.R., Goebel D., Katz I.* XIPS Ion Thruster Grid Erosion Assessment for Deep Space Missions // 30th International Electric Propulsion Conference IEPC-2007-265, Florence, Italy, 17-20 September, 2007, 9 p.
7. *Духопельников Д.В., Ивахненко С.Г.* Влияние азимутального отклонения ионов на форму пучка двигателя с анодным слоем // Наука и образование. 2012. № 10. С. 157-164.
8. *Духопельников Д.В., Воробьев Е.В., Ивахненко С.Г.* Управление ионными потоками в холловских ускорителях // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 2. С. 24-30.
9. *Polk J., Anderson J., Brophy J., Rawlin V.K., Patterson M.J., Sovey J.* In Situ, Time-Resolved Accelerator Grid Erosion Measurements the NSTAR 8000 Hour Ion Engine Wear Test // 25th International Electric Propulsion Conference, Cleveland, OH, USA, Aug. 1997.
10. *Polk J., Anderson J., Brophy J., Rawlin V., Patterson M., Sovey J., Hamley J.* An overview of the results from an 8200 hour wear test of the NSTAR ion thruster // 35th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Los Angeles, CA, USA, June 1999.
11. *Khaustova A., Lohan A.* Method for the erosion rate measurements of stationary plasma thruster insulators // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 3. № 5(87), pp. 11-17. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.99295
12. *Domonkos M.T., Stevens R.E.* Assessment of Spectroscopic, Real-Time Ion Thruster Grid Erosion-Rate Measurements // 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE

- Joint Propulsion Conference and Exhibits AIAA–2000–3815, Las Vegas, NV, USA, 24–28 July, 2000. DOI: 10.2514/6.2000-3815
13. *Abgaryan V.K., Akhmetzhanov R.V., Cherkasova M.V., Loeb H.W., Obukhov V.A.* Numerical Simulation of a High-Perveance Ion-Optical System with a Plasma Emitter // *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2013. Vol. 7. No. 6, pp. 1092-1099. DOI: 10.1134/S1027451013060037
 14. *Chaplin V.H., Polk J.E., Katz I., Williams G., Soulas G.C., Yim J., Anderson J.R.* 3D simulations of Ion Thruster Accelerator Grid Erosion Accounting for Charge Exchange Ion Space Charge // *Joint Propulsion Conference*, Cincinnati, Ohio, USA, 09-11 July, 2018. DOI: 10.2514/6.2018-4812
 15. *Brophy J.R., Katz I., Polk J.E., Anderson J.R.* Numerical Simulations of Ion Thruster Accelerator Grid Erosion // *38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Indianapolis, Indiana, USA, 7-10 July, 2002. DOI: 10.2514/6.2002-4261
 16. *Poeschel R.L., Beattie J.R.* Primary Electric Propulsion Technology Study. — Final Technical Report, Hughes Research Labs., Malibu, CA, United States, Nov. 1979. — 196 p.
 17. *Barker T.* Impingement-Current-Erosion Characteristics of Accelerator Grids on Two-Grid Ion Thrusters. — Final Technical Report, Colorado State Univ.; Dept. of Mechanical Engineering.; Fort Collins, CO United States, 1996. — 86 p.
 18. *Духопельников Д.В., Воробьев Е.В., Ивахненко С.Г., Ахметжанов Р.В., Обухов В.А., Попов Г.А., Хартов С.А.* Методика визуализации и определения профиля эрозии поверхности, вызванной ионной бомбардировкой // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2016. №1. С. 15-20. DOI: 10.7868/S020735281601011X
 19. *Ахметжанов Р.В., Богатый А.В., Каширин Д.А., Обухов В.А., Черкасова М.В.* Ускоренные ресурсные испытания ионного двигателя // *Тезисы докладов на 15-й Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2016» (МАИ, 14-18 ноября 2016)*. — М.: Люксор, 2016. С. 257-258.
 20. *Ахметжанов Р.В.* Оценка скорости эрозии ускоряющего электрода двухэлектродной ионно-оптической системы ионного двигателя на укороченной временной базе // *XLI Академические чтения по космонавтике (МГТУ имени Н.Э. Баумана, 24-27 января 2017): Тезисы докладов*. — М.: Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2017. С. 75-76.

TECHNIQUE JUSTIFICATION FOR EROSION PROFILE DETERMINING OF THE ACCELERATING ELECTRODE OF IONS GAS-DISCHARGE SOURCE

Dukhopel'nikov D.V.*, Vorob'ev E.V.**

*Bauman Moscow State Technical University,
MSTU, 5, 2-nd Baumanskaya, Moscow, 105005, Russia*

** e-mail: duh@bmstu.ru*

*** e-mail: evgsparrow@gmail.com*

Abstract

Determining erosion rate of electric rocket engines elements and other gas-discharge devices is the most important stage of their design and testing. The simplest method to determine the surface erosion rate under the ion bombarding may be employing of optically contrasted multilayer coatings pre-applied to the surface under study. The pattern of alternating optically contrasted bands occurs while sputtering these coatings by the non-uniform ion beams. The boundaries between these bands are the lines of equal erosion depth.

The surface slope angle in the erosion zone while a massive material sputtering by a non-uniform ion beam is determined by the equation

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{dh}{dx} = \frac{M_a S_{\text{eff}} t}{q\rho} \frac{dj}{dx} \quad (1)$$

where M_a is the atomic mass of the material, ρ is its density, S_{eff} is effective sputtering rate, j is the ion current density, t is the ion beam exposure time, and q is the ion charge.

While selecting a multilayer coating structure computation of separate layers thickness δ_i is performed on the assumption of the required band width and the surface slope angle in the erosion zone

$$b_i = \frac{\delta_i}{\operatorname{tg}(\alpha_i)} \quad (2)$$

The layers thickness herewith should be selected so that the bands widths on the image repeatedly exceeded the registration resolution of the equipment employed for the sputtered patterns photo-registration. Thus, to obtain accurate results using the represented

technique, the correct surface slopes angles α , determining is required.

At the same time, while sputtering multilayer coatings, different points of the layer, lying in depth, begin sputtering at different time moments, in contrast the massive material. Thus, the necessity occurred to confirm the correctness of application of the expressions, obtained for the massive material, to the layers thicknesses computing of the multilayer coating.

This article is dedicated to the analytical proof of the expressions usage appropriateness to calculate the erosion slope angle and the layers thickness in the depth of the multilayer coating. It shows that these expressions can be used for any layer of any material located in the depth of the multilayer coating of arbitrary structure.

Keywords: erosion profile, ion bombardment, multilayer coatings, ion-optical system, ion thrusters, accelerated test.

References

1. Arkhipov A.S., Kim V.P., Sidorenko E.K. *Statsionarnyye plazmennyye dvigateli Morozova* (Morozov stationary plasma engines), Moscow, MAI, 2012, 292 p.
2. Obukhov V.A., Pokryshkin A.I., Popov G.A., Yashina N.V. The usage of a sustainer electric propulsion system for spacecraft attitude control. *Aerospace MAI Journal*, 2009, vol. 16, no. 3, pp. 30-40.
3. Obukhov V.A., Pokryshkin A.I., Popov G.A., Yashina N.V. Motion and orientation control for spacecraft on a high elliptic orbit. *Aerospace MAI Journal*, 2007, vol. 14, no. 4, pp. 22-29.
4. Goebel D.M. and Katz I. *Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters*. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 2008, 486 p.
5. Polk J. Overview of the USA Electric Propulsion Programs. *30th International Electric Propulsion Conference IEPC-2007-388*, Villa Vittoria, Florence, Italy, 17-20 September, 2007.
6. Wirz R.E., Anderson J.R., Goebel D., Katz I. XIPS Ion Thruster Grid Erosion Assessment for Deep Space Missions. *30th International Electric Propulsion Conference IEPC-2007-265*, Florence, Italy, 17-20 September, 2007, 9 p.
7. Dukhopel'nikov D.V., Ivakhnenko S.G. *Nauka i obrazovanie*, 2012, no. 10, pp. 157-164.
8. Dukhopel'nikov D. V., Vorob'ev E. V., Ivakhnenko S. G. Ion flux control in hall accelerators. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 2, pp. 24-30.
9. Polk J., Anderson J., Brophy J., Rawlin V.K., Patterson M.J., Sovey J. In Situ, Time-Resolved Accelerator Grid Erosion Measurements the NSTAR 8000 Hour Ion Engine Wear Test. *25th International Electric Propulsion Conference*, Cleveland, OH, USA, Aug. 1997.
10. Polk J., Anderson J., Brophy J., Rawlin V., Patterson M., Sovey J., Hamley J. An overview of the results from an 8200 hour wear test of the NSTAR ion thruster. *35th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Los Angeles, CA, USA, June 1999.
11. Khaustova A., Loyan A. Method for the erosion rate measurements of stationary plasma thruster insulators. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, vol. 3, no. 5(87), pp. 11-17. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.99295
12. Domonkos M.T., Stevens R.E. Assessment of Spectroscopic, Real-Time Ion Thruster Grid Erosion-Rate Measurements. *36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibits AIAA-2000-3815*, Las Vegas, NV, USA, 24-28 July, 2000. DOI: 10.2514/6.2000-3815
13. Abgaryan V.K., Akhmetzhanov R.V., Cherkasova M.V., Loeb H.W., Obukhov V.A. Numerical Simulation of a High-Perveance Ion-Optical System with a Plasma Emitter. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2013, vol. 7, no. 6, pp. 1092-1099. DOI: 10.1134/S1027451013060037
14. Chaplin V.H., Polk J.E., Katz I., Williams G., Soulas G.C., Yim J., Anderson J.R. 3D simulations of Ion Thruster Accelerator Grid Erosion Accounting for Charge Exchange Ion Space Charge. *Joint Propulsion Conference*, Cincinnati, Ohio, USA, 09-11 July, 2018. DOI: 10.2514/6.2018-4812
15. Brophy J.R., Katz I., Polk J.E., Anderson J.R. Numerical Simulations of Ion Thruster Accelerator Grid Erosion. *38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Indianapolis, Indiana, USA, 7-10 July, 2002. DOI: 10.2514/6.2002-4261
16. Poeschel R.L., Beattie J.R. *Primary Electric Propulsion Technology Study*. Final Technical Report, Hughes Research Labs., Malibu, CA, United States, Nov. 1979, 196 p.
17. Barker T. *Impingement-Current-Erosion Characteristics of Accelerator Grids on Two-Grid Ion Thrusters*. Final Technical Report, Colorado State Univ.; Dept. of Mechanical Engineering.; Fort Collins, CO United States, 1996, 86 p.
18. Dukhopel'nikov D.V., Vorobyev E.V., Ivakhnenko S.G., Akhmetzhanov R.V., Obukhov V.A., Popov G.A., Khartov S.A. Technique for the visualization and determination of the surface-erosion profile caused by ion bombardment. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2016, vol. 10, no. 1, pp. 10-14. DOI: 10.1134/S1027451016010110
19. Akhmetzhanov R.V., Bogaty A.V., Kashirin D.A., Obukhov V.A., Cherkasova M.V. *Materialy 15 Mezhdunarodnoi konferentsii "Aviatsiya i kosmonavtika - 2016"* (MAI, 14-18 November 2016), Moscow, Lyuksor, 2016, pp. 257-258.
20. Akhmetzhanov R.V. *Materialy XLI Akademicheskikh chtenii po kosmonavtike* (Bauman MGTU, 24-27 January 2017), Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 2017, pp. 75-76.