

УДК 621.455.4, 533.9.07, 678

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ЭЛЕКТРОДАМИ ИОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ, ИЗГОТОВЛЕННЫМИ ИЗ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ НЕТКАНОГО УГЛЕРОДНОГО КАРКАСА

© 2023 г. Р. В. Ахметжанов¹, *, А. В. Богатый¹, Е. А. Богачев², С. В. Гордеев¹, А. Б. Елаков²,
Д. А. Каширин¹, Ю. С. Перминова², Г. А. Попов¹, М. В. Черкасова¹

¹Научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики
Московского авиационного института, Москва, Россия

²АО «Композит», Королёв, Россия

*ahmetzhanov1991@mail.ru

Поступила в редакцию 24.03.2023 г.

После доработки 10.04.2023 г.

Принята к публикации 12.04.2023 г.

Представлены результаты тысячекратных испытаний высокочастотного ионного двигателя (ВЧИД) с электродами ионно-оптической системы (ИОС), изготовленными из углерод-углеродного композиционного материала. После проведения испытаний выполнена оценка качества поверхности ускоряющего электрода ИОС-двигателя — ключевого элемента конструкции ВЧИД с точки зрения ресурса, которая проводилась визуальным осмотром и сканирующей электронной микроскопией (СЭМ). Была определена максимальная глубина эрозионной выемки на поверхности ускоряющего электрода. Методом микрорентгеноспектрального анализа был проведен элементный анализ поверхностей электрода.

DOI: 10.31857/S0023420623700103, EDN: NERQOF

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время малые космические аппараты (МКА) оснащаются двигательными установками с недостаточно высокими скоростями истечения рабочего тела, что ограничивает массу полезной нагрузки и срок активного существования аппарата. Для эффективного решения различных задач в космосе (навигация, дистанционное зондирование Земли, связь) с использованием МКА необходимы электроракетные двигатели (ЭРД) малой мощности с относительно высоким удельным импульсом тяги, а также с высоким ресурсом работы.

Требование высокого ресурса ЭРД особенно актуально для низкоорбитальных МКА. Так, для повышения эффективности работы регистрирующей аппаратуры перспективных низкоорбитальных космических аппаратов (НОКА) высоту их орбиты целесообразно выбирать в диапазоне 250...300 км. Однако на этих высотах остаточная атмосфера создает, с учетом орбитальной скорости аппарата, аэродинамическое сопротивление, приводящее к торможению КА и снижению высоты его орбиты [1–4]. Срок активного существо-

вания (САС) КА на низких орбитах колеблется от нескольких дней до нескольких месяцев, поэтому высоту орбиты для длительного существования КА выбирают выше. При этом эффективность целевой аппаратуры снижается. Для увеличения САС КА снижение из-за торможения должно компенсироваться приращением скорости аппарата с помощью корректирующей двигательной установки. В перспективных разработках НОКА предполагается их длительное функционирование на рабочей орбите, что потребует значительного увеличения массы топлива корректирующей двигательной установки. Для существующих двигательных установок с жидкостными ракетными двигателями даже увеличение срока существования КА до одного года приведет к практически полному сокращению массы целевой аппаратуры.

Известен опыт длительной работы (более четырех лет) НОКА *GOCE* (англ. Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer, исследователь гравитационного поля и установившихся океанских течений) Европейского космического агентства на орбитах 240...260 км [5, 6]. Высота орбиты поддерживалась и корректировалась при

помощи двигательной установки с ЭРД T5 фирмы QinetiQ, для этого потребовался запас рабочего тела (ксенона) около 40 кг [7]. Аппарат прекратил существование по завершению выработки всей массы рабочего тела. В России началась успешная эксплуатация ЭРД на орбитах 500...520 км на КА “Канопус-В” [8].

Одними из наиболее подходящих двигателей для низкоорбитальных МКА выступают ионные двигатели, обладающие достаточно высоким ресурсом (десятки тысяч часов) и высоким удельным импульсом. Ионно-оптическая система (ИОС), а точнее ее ускоряющий электрод (УЭ), представляется критическим элементом двигателя с точки зрения его ресурса. В объеме пучка ионов, а также в зоне нейтрализации ионного пучка электронами в результате столкновения быстрых ионов рабочего тела (чаще всего в качестве него используется ксенон) и медленных нейтральных атомов, истекающих из двигателя, образуются медленные ионы перезарядки. Под действием электрического поля часть этих ионов попадает на ускоряющий электрод, вызывая его эрозию [9]. Поэтому выбор материала УЭ, устойчивого к распылению ионами рабочего тела, становится важной задачей при проектировании двигателя.

ВЫБОР МАТЕРИАЛА УСКОРЯЮЩЕГО ЭЛЕКТРОДА

Используемые для электродов ИОС ВЧИД титановые и молибденовые сплавы имеют ряд недостатков, из которых можно отметить: относительно высокие значения коэффициентов термического линейного расширения (КТЛР); относительно высокие значения коэффициентов ионного распыления, характеризующие эрозионный унос; опасность развития межкристаллитной коррозии [10, 11].

В последние годы реальной альтернативой металлическим сплавам применительно к электродам ИОС стали материалы на основе углерода, имеющие наиболее низкий коэффициент ионного распыления. Материалы на основе углерода, такие как изостатический графит или пирографит, обладают более низкими КТЛР $(0...4.5) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, что дает дополнительное преимущество перед традиционно используемыми молибденом, титаном и сплавами на их основе [12, 13]. Это свойство углеродных материалов делает целесообразным изготовление из них не только УЭ, но и очень тонких эмиссионных электродов (ЭЭ), что обеспечивает их стабильность при нагреве работающего ионного двигателя до температуры около 400°C и перепаде температуры на поверхности электрода до 100°C [14].

Углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) имеют ряд преимуществ: невысокую плотность, низкие значения КТЛР, высокую размеростабильность во всем интервале рабочей температуры, высокую эрозионную стойкость, отсутствие межкристаллитной коррозии [15]. УУКМ отвечают по своим характеристикам практически всем требованиям, предъявляемым к электродам ИОС, за исключением чистоты поверхности. Серийно производимые УУКМ на тканно-выкладочной, стержневой и нитяной основе не обеспечивают требований по шероховатости поверхности из-за структурной неоднородности углеродных каркасов, для которых характерно сочетание областей крупноячеистого межволоконного пространства с мезопористостью межфиламентных пустот внутри волокон. Эта особенность типична для производства, например, деталей на основе ткани УТ-900. Такая неоднородность наблюдается и получаемыми на основе данных каркасов конструктивными материалами. Иную структуру имеют углеродные нетканые материалы войлочного типа, например, на основе нетканого окисленного полиакрилонитрила. Выпускаемые промышленностью каркасы на основе углеродных войлоков имеют плотность около 0.2 г см^{-3} , что не позволяет использовать их для достижения высокой конструкционной прочности в композите.

В АО “Композит” совместно с ООО “Ниагара” разработан способ изготовления пористого каркаса-основы композиционного материала [16], позволяющий при помощи иглопробивной технологии получить мелкоячеистый армирующий углеродный каркас марки Ипресскон® плотностью $(0.5...0.6) \text{ г см}^{-3}$, а в последующем — УУКМ на его основе.

Основные характеристики УУКМ-Ипресскон®, из которого были изготовлены электроды, представлены в табл. 1.

Все механические свойства УУКМ-Ипресскон® находятся на уровне либо превышают свойства серийно выпускаемых УУКМ.

ПОДГОТОВКА И ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве образца для проведения эксперимента использовался опытный образец высокочастотного ионного двигателя малой мощности ВЧИД-8, созданный в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) (МАИ) и АО “Конструкторское бюро химавтоматики” в 2013–2015 гг. [12]. В АО “Композит” были изготовлены эмиссионный и ускоряющий электроды для данного образца. Электроды были выполнены из УУКМ-Ипресскон®. Фотографии электродов представлены на рис. 1 и 2.



Рис. 1. Ускоряющий электрод.

При проведении испытаний поддерживались следующие основные параметры двигателя:

- расход рабочего тела (ксенона): 2.3 ст. см³/мин (внесистемная единица измерения “кубический сантиметр в минуту при стандартных условиях”);
- ток ионного пучка: 100 мА;
- потенциал ЭЭ: 2000 В;
- потенциал УЭ: –200 В.

Следует отметить, что при разности потенциалов между ЭЭ и УЭ 2200 В межэлектродный зазор составлял всего лишь 0.8 мм, т.е. пробойная прочность составила 2.75 кВ/мм. Это стало возможным благодаря низкому уровню шероховатости поверхности материала электрода (достижимое значение $R_a = 0.16$ мкм), сопоставимого с металлами. Обычно для УУКМ пробойная прочность составляет не более 2.2...2.3 кВ/мм [17].

Экспериментальные исследования проводились на стенде ИУ-2 Научно-исследовательского института прикладной механики и электродинамики (НИИ ПМЭ) МАИ. Данный стенд предназначен для проведения исследовательских испытаний ЭРД мощностью до 1 кВт (рис. 3).

Диаметр вакуумной камеры составляет 1 м, длина 2.5 м. Вакуумный стенд оснащен безмасляными средствами откачки. Для получения пред-



Рис. 2. Эмиссионный электрод.



Рис. 3. Исследовательский стенд ИУ-2.

варительного разряжения в вакуумной камере используется безмасляный форвакуумный насос Kashiyama MU-603 со скоростью откачки 166 л/с, для достижения высокого вакуума используются (при давлении 10^{-5} Торр): криогенный насос

Таблица 1. Основные характеристики УУКМ на основе преформы Ипресскон®

Параметр	Значение
Объемная плотность	1.88...1.95 г/см
Прочность при растяжении при 20°C, ($X-Y$)	70...80 МПа
Модуль упругости при растяжении	50...55 ГПа
Прочность при сжатии при 20°C	140...220 МПа
Прочность при трехточечном изгибе при 20°C	90...140 МПа
Коэффициент Пуассона	0.1...0.2
Достижимая шероховатость поверхности R_a	0.16 мкм

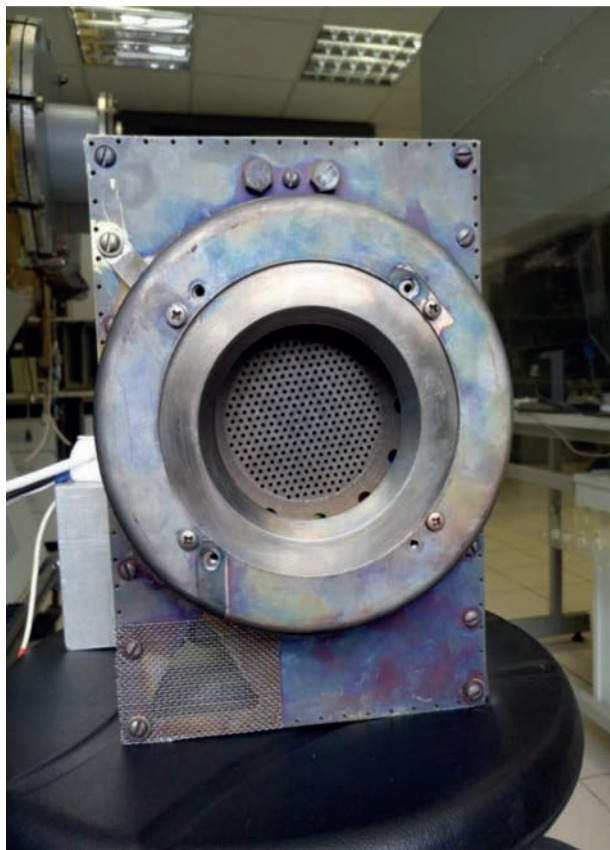


Рис. 4. ВЧИД с электродами из УУКМ-Ипресскон перед установкой в вакуумную камеру.

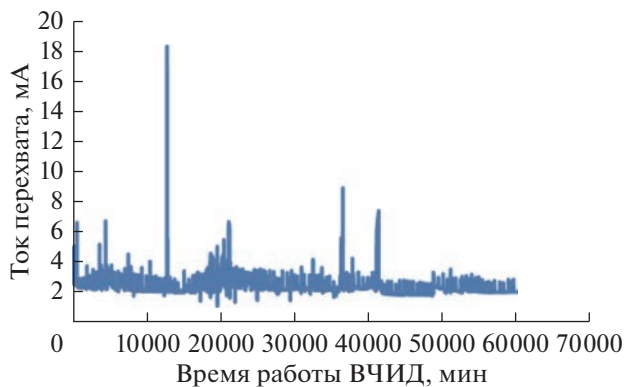


Рис. 5. Изменение тока в цепи источника питания УЭ.

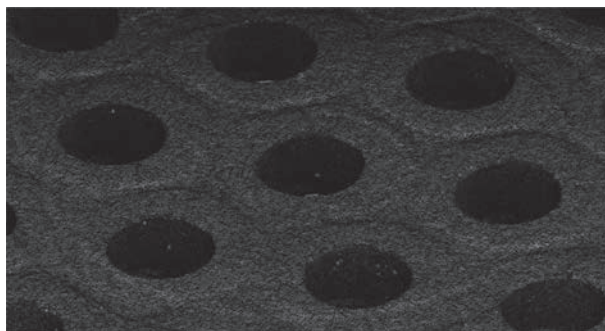


Рис. 6. Эрозия поверхности УЭ ВЧИД.

Velco 402 Xe со скоростью откачки 6800 л/с (по ксенону), криогенный насос СТИ-Cryogenics On-board 400 со скоростью откачки 5000 л/с (по ксенону), два турбомолекулярных насоса Shimadzu TMP-3403 LM со скоростью откачки 3100 л/с (по ксенону). Скорость откачки при давлении 10^{-5} Торр и работе всех насосов составит 18900 л/с (по ксенону). Предельное разрежение (с учетом натекания) составляет $5.0 \cdot 10^{-7}$ Торр.

Вакуумный стенд оснащен системой подачи газа (ксенона) на основе контроллеров подачи газа фирмы MKS (0...10 ст. см³/мин) и фирмы Alicat (0...0.5 и 0...1 ст. см³/мин), которые позволяют обеспечивать раздельную подачу газа к испытываемому образцу и катоду-нейтрализатору.

В ходе проведения эксперимента были задействованы только турбомолекулярные насосы, что позволяло иметь давление в вакуумной камере во время работы двигателя менее $4 \cdot 10^{-5}$ Торр.

Фотография двигателя перед установкой в вакуумную камеру представлена на рис. 4.

Испытания экспериментального образца ВЧИД с электродами из УУКМ-Ипресскон® проводились на протяжении 1000 ч. В ходе исследо-

ваний основным контролируемым параметром был ток в цепи источника питания УЭ, вызванный выпадением ионов перезарядки на УЭ. Среднее значение тока ионов перезарядки составило 2.31 мА, т.е. менее 3% от тока первичного пучка, что говорит о хорошем выборе параметров ИОС и о высоком качестве изготовления и сборки ИОС и ее элементов. График изменения тока в цепи источника питания УЭ представлен на рис. 5. Отдельные повышения тока в цепи источника питания УЭ связаны с разовыми пробоями, не влияющими на характеристики двигателя.

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛА УСКОРЯЮЩЕГО ЭЛЕКТРОДА ПОСЛЕ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Оценка качества поверхности электрода проводилась посредством визуального осмотра и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). При этих исследованиях использовали сканирующий электронный микроскоп JSM-6610 LV с энергодисперсионным анализатором Advanced AZtec. Исследования микроструктуры проводили при увеличениях до 1000 крат. Изображение в сканирующем микроскопе получали во вторичных

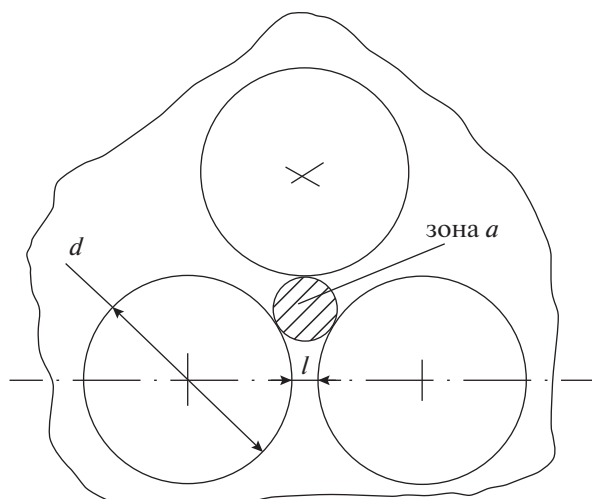


Рис. 7. Зона интенсивной эрозии УЭ.

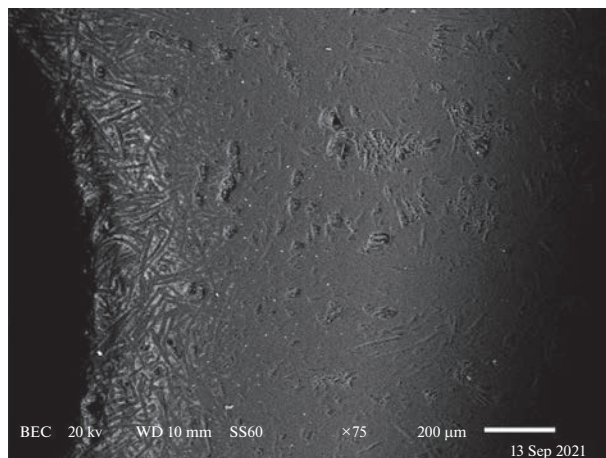


Рис. 8. СЭМ рабочей поверхности ускоряющего электрода после стендовых испытаний.

электронах (secondary electrons – SEI), которые проявляют главным образом контраст рельефа, сформированного на поверхности образца, и в отраженных электронах (back scattered electrons – BEC), которые проявляют главным образом контраст атомного номера.

После проведения экспериментальных исследований на поверхности УЭ образовалась характерная картина эрозии “ямок и канавок” (рис. 6). При этом максимальная глубина эрозии составила 0.071 мм, что позволяет оценить время работы ВЧИД до образования паразитных отверстий в ускоряющем электроде в более чем 28 тыс. ч.

Однако двигатель при этом не теряет работоспособность. Критерием отказа двигателя принято считать распыление всего материала УЭ в зоне, ограниченной окружностью, касающейся границ трех соседних отверстий УЭ (рис. 7).

При распылении всего материала УЭ в зоне “а” двигатель перестает быть работоспособным.

Элементный анализ проводился методом микрорентгеноспектрального анализа (МРСА). Данные МРСА являются количественными при исследовании фрагментов полированной поверхности электрода. Использованный анализа-

тор позволяет получать сигналы только элементов с атомным номером больше 4. Чувствительность анализа для легких элементов находится в пределах от 1 до 5%. Содержание элементов в анализируемом образце менее 0.1% не определялось. Результаты количественного анализа структурных составляющих достоверны при их размерах более 3 мкм. Результаты количественного анализа структурных составляющих при определении легких элементов достоверны при их размерах более 5 мкм.

На рабочей поверхности ускоряющего электрода после стендовых испытаний наблюдаются темные области вокруг отверстий шириной 250...300 мкм (рис. 8), при наблюдении этих областей в обратно-отраженных электронах заметно, что пространство между волокнами окрашено в ярко-белый цвет, что свидетельствует о высоком атомном номере элементов.

По результатам МРСА, представленным в табл. 2, между волокон скапливается ксенон – инертный газ, которым насыщается поверхность электрода в процессе стендовых испытаний. Также на рабочей поверхности электрода наблюдаются небольшие сколы на кромках и поры размером около 20 мкм.

Таблица 2. МРСА рабочей поверхности ускоряющего электрода после стендовых испытаний, ат. %

Химический элемент	Спектр 24	Спектр 25	Спектр 26	Спектр 27
С (углерод)	99.96	99.93	99.91	99.88
Si (кремний)	—	0.04	0.09	—
Ti (титан)	0.04	0.04	—	—
Хе (ксенон)	—	—	—	0.12
Сумма	100.00	100.00	100.00	100.00

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В АО “Композит” был создан углерод-углеродный композиционный материал марки Ипресскон®, и из него были изготовлены эмиссионный и ускоряющий электроды ионно-оптической системы высокочастотного ионного двигателя малой мощности. В НИИ ПМЭ МАИ были проведены исследовательские испытания ВЧИД с этими электродами продолжительностью 1000 ч, показавшие применимость и высокие рабочие характеристики данного материала для производства как эмиссионного, так и ускоряющего электродов ИД. Полученная в ходе экспериментальных исследований скорость эрозии позволяет сделать вывод о возможности достижения высокого ресурса ИД (более 28 тыс. ч) при использовании в их составе ускоряющего электрода из УУКМ-Ипресскон.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kanev S.V., Petukhov V.G., Popov G.A., Khartov S.A. Electro-rocket ramjet thruster for compensating the aerodynamic drag of a low-orbit spacecraft // *Russian Aeronautics*. 2015. V. 58. Iss. 3. P. 286–291. <https://doi.org/10.3103/S106879981503006X>
2. Popov G.A., Suvorov M.O., Syrin S.A., Khartov S.A. Air-Breathing ramjet electric propulsion thruster for controlling low-orbit spacecraft motion and for compensating its aerodynamic drag // *Advances in the Astronautical Sciences*. 2017. V. 161. P. 833–841.
3. Erofeev A.I., Nikiforov A.P., Popov G.A. et al. Air-Breathing Ramjet Electric Propulsion for Controlling Low-Orbit Spacecraft Motion to Compensate for Aerodynamic Drag // *Solar System Research*. 2017. V. 51. Iss. 7. P. 639–645. <https://doi.org/10.1134/S0038094617070048>
4. Gordeev S., Kanev S., Khartov S. et al. Electric propulsion system based on the air-breathing radio-frequency ion thruster using the upper atmosphere gases as propellant // *Proc. 69th Intern. Astronautical Congress*. Bremen, Germany, 1–5 Oct. 2018. Art. ID: 42673.
5. Wallace N., Jameson P., Saunders C. et al. The GOCE Ion Propulsion Assembly – Lessons Learnt from the First 22 Months of Flight Operations // *32nd Intern. Electric Propulsion Conf.* Wiesbaden, Germany, 11–15 Sept. 2011. Art. ID. IEPC-2011-327.
6. Steiger C., Romanazzo M., Emanuelli P.P. et al. Flying at the edge – Extremely low altitude operations for ESA’s drag-free gravity mission GOCE // *AIAA Guidance, Navigation, and Control (GNC) Conf.* Boston, MA, 19–22 Aug. 2013. Art. ID. AIAA 2013-4772.
7. Steiger C., Piñeiro J., Emanuelli P.P. Operating GOCE, the European Space Agency’s low-flying gravity mission // *SpaceOps 2010 Conf. Delivering on the Dream Hosted by NASA*. Huntsville, AL, 25–30 Apr. 2010. Art. ID. AIAA 2010-2125.
8. Asmus V.V., Volgutov R.V., Deryugina V.V. et al. Satellite Technologies Applied to Hydrometeorological Problems in the Arctic Region // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2019. V. 44. Iss. 4. P. 250–261. <https://doi.org/10.3103/S1068373919040046>
9. Akhmetzhanov R., Loeb H.W., Cherkasova M.V., Obukhov V.A. Numerical Simulation of a System of Formation of an Intense Ion Beam From Gas Discharge Plasma of an Ion Thruster // *64th Intern. Astronautical Congress*. Beijing, China, 23–27 Sept. 2013. Art. ID. IAC-13-C4.4.1.
10. Антипов Е.А., Балашов В.В., Вебер А.В. и др. Выбор конструкционных материалов для высокочастотных ионных двигателей // *Электрон. журн. Тр. МАИ*. 2013. № 65. 15 с. <http://trudymai.ru/published.php?ID=35964>
11. Абгарян В.К., Ахметжанов Р.В., Леб Х.В. и др. Моделирование эрозии ускоряющего электрода ионно-оптической системы ионного двигателя // *Взаимодействие ионов с поверхностью: ВИП-2013: Тр. 21-й Международ. конф.* 22–26 авг. 2013. Ярославль, Россия. 2013. Т. 1. С. 95–98.
12. Antropov N.N., Akhmetzhanov R.V., Bogaty A.V. et al. Experimental research of radio-frequency ion thruster // *Thermal Engineering*. 2016. V. 63. Iss. 13. P. 957–963. <https://doi.org/10.1134/S0040601516130036>
13. Leiter H.J., Loeb H.W., Schartner K.-H. The RIT15 ion engines – A survey of the present state of radio frequency ion thruster technology and its future potentiality European Space Agency // *Spacecraft Propulsion. 3rd Intern. Conf.* 10–13 Oct. 2000, Cannes, France / ed. R.A. Harris; European Space Agency, 2001. ESASP-465. P. 423–432.
14. Abgaryan V.K., Kruglov K.I. Thermal model of RF ion thrusters and ion sources // *J. Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2015. V. 9. Iss. 6. P. 1137–1143
15. Li J., Qiu J., Chu Y., Zhang T. et al. Ion Thruster Grid Lifetime Assessment Based on Its Structural Failure // *Intern. J. Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engin.* 2015. V. 9. Iss. 11. P. 1978–1981.
16. Богачев Е.А., Елаков А.Б., Белоглазов А.П., Денисов Ю.А., Тимофеев А.Н. Способ изготовления пористого каркаса-основы композиционного материала: Патент РФ № 2620810. Опул. 29.05.2017. Бюл. № 16.
17. Goebel D., Katz I. Fundamental of electric propulsion: Ion and Hall Thrusters / *Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology. Space and Technology Series*. 2008. 493 p. <https://doi.org/10.1002/9780470436448>