

УДК 533.9.07

А. Н. ХАУСТОВА, А. В. ЛОЯН, Е. И. ИЩЕНКО

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ЭРОЗИИ РК СПД 1,5 кВт МЕТОДОМ ОЭССК ВО ВРЕМЕНИ

Измерение спектра излучения продуктов распыления РК СПД, для количественной оценки скорости эрозии изоляторов анодного блока двигателя, производится после полной стабилизации износа РК во времени. Период установления скорости эрозии РК зависит от предпускового состояния двигателя и определяется экспериментальным путем. В работе показаны исследования зависимости эрозии РК от времени СПД мощностью 1,5 кВт методом оптической эмиссионной спектроскопии со сканированием плазмы двигателя через коллиматор. Приведены результаты определения времени стабилизации износа керамических вставок СПД.

Ключевые слова: стационарный плазменный двигатель, ресурс, скорость эрозии, оптическая эмиссионная спектроскопия со сканированием плазмы двигателя через коллиматор

Введение

Прибыль от эксплуатации космической техники напрямую зависит от ресурса космического аппарата (КА). В настоящее время срок окупаемости КА составляет около 5 лет. Этим, в частности, определяется приемлемый сегодня минимальный ресурс спутника в 10 л и попытки его повышения до 15 лет и более [1]. Ужесточение требований к КА закономерно приводит к росту требований к ДУ.

Необходимость в снижении запаса топлива и потребность в увеличении удельного импульса до 1000 с и выше, повлекло широкое внедрение электроракетных двигателей (ЭРД) на КА, что невозможно было обеспечить за счет жидкостных ракетных двигателей [1]. На сегодняшний день одним из наиболее приоритетных типов ЭРД применяемых на спутниках является стационарный плазменный двигатель (СПД) [2]. При использовании ксенона, в качестве рабочего тела, рассматриваемый тип ЭРД показывает наилучшие выходные характеристики в диапазоне удельных импульсов тяги 1500...2000 с [3]. При энергопотреблении 1,0...1,5 кВт СПД обеспечивает тягу в диапазоне 60...80 мН, при этом КПД двигателя составляет ~ 50 %. Если по таким параметрам как удельный импульс, тяга, КПД СПД удовлетворяют требованиям технического задания, то ресурса СПД, для задач как коммерческого, так и научного назначения, недостаточно.

Одним из факторов, ограничивающих ресурс СПД, является эрозия – постепенное послойное разрушение поверхности материала конструкции двигателя в результате воздействия ионного потока. Известно, что наиболее подвержены эрозии кромки

разрядной камеры (РК) двигателя. По результатам длительных испытаний СПД [2] определено, что только после полной выработки толщины кромок изоляторов РК начинается интенсивная выработка ресурса магнитных экранов и элементов катода. В связи с этим ресурс катода и магнитной системы превышает требования заказчика, а ресурс РК в полтора раза ниже востребованного. В связи с этим, работы направленные на изучение эрозии РК СПД является актуальной задачей.

Исследования износа РК СПД проводятся при помощи различных методов диагностики. В лаборатории электроракетных двигателей ХАИ используют оптическую эмиссионную спектроскопию со сканированием плазмы двигателя через коллиматор (ОЭССК), в силу ряда преимуществ данного метода диагностики [4].

Определение износа РК при различных режимах работы СПД путем измерений спектра излучения методом ОЭССК, возможно только после стабилизации скорости эрозии. Время установления износа изоляторов РК во времени исследовалось экспериментальным путем.

1. Схема эксперимента

Эксперимент был проведен для двигателя модели СПД-100 мощностью 1,5 кВт. В качестве материала изолятора данного двигателя использовался нитрид бора (BN). Режим работы двигателя: напряжение разряда – 300 В, анодный расход 4,0 мг/с, токи катушек выбирались из условия минимального тока разряда. Регистрация спектра производилась при помощи измерительного комплекса ОЭССК

разработанного в лаборатории ЭРД ХАИ [5]. Схема оборудования представлена на рисунке 1. Измерительный комплекс состоит из блока спектрометров высокого разрешения HR и двух-координатной системы позиционирования оптического приемника (ОП).

Ранее было определено, что в процессе измерений постепенно снижается пропускная способность оптического приемника [6]. Причиной этого служит его загрязнение продуктами распыления конструкции двигателя [5]. По указанной причине был установлен защитный экран оптического приемника (ЗЭОП), который представляет собой перемещающуюся кварцевую пластину. После проведения ряда измерений она передвигается на заранее заданную величину, обеспечивая прохождение потока фотонов через «чистый», не запыленный, участок ЗЭОП.

Схема эксперимента представлена на рисунке 1. ОП и ЗЭОП устанавливались в стационарном положении относительно двигателя. В области обзора ОП находились оба изолятора РК. Регистрация спектра излучения продуктов распыления керамических вставок и частиц ксенона производилась одновременно тремя спектрометрами в следующих диапазонах: 240...270 нм, 380...830 нм и 780...850 нм непосредственно с момента запуска СПД.

Для предотвращения поглощения спектра УФ диапазона измерительный комплекс ОЭССК оснащен системой подачи азота в корпуса спектрометров УФ диапазона, рис. 1.

Для расчета скорости эрозии E_r по интенсивностям спектральных линий использована методика, предложенная в [7]. Расчетное выражение имеет вид:

$$E_r = I^B \frac{I^{Xe}}{I^{Xe+m}} \approx N_B, \quad (1)$$

где I^B – интенсивность линии бора, нм;

I^{Xe} – интенсивность линии атома ксенона, нм;

I^{Xe+m} – интенсивность линии иона ксенона метастабильного.

В качестве опорных линий ксенона, выражения (1), были выбраны: линия возбужденного атома ксенона с длиной волны 828 нм, линия возбужденного иона ксенона с длиной волны 484 нм, согласно, а также линия возбужденного атома бора с длиной волны 249,77 нм.

Регистрация спектра проводилась непосредственно с момента запуска СПД. Каждые полчаса ЗЭОП перемещался в «чистое» положение, результаты измерений и расчетов приведены на рисунке 2.

После регистрации спектра произведена процедура обработки данных. Для получения истинных профилей спектральных линий произведена аппроксимация зависимостей интенсивностей линий (I) от длины волны (λ): $I=f(\lambda)$. Форм-фактор спектральной линии может описываться как зависимостью Лоренца, так и зависимостью Гаусса. Зависимость Лоренца применяется в том случае, если на профиль спектральной линии наибольшим образом влияет механизм уширения давлением. Уравнение Гаусса используется при Максвелловском распределении частиц по скоростям, что справедливо для описания состояния частиц плазмы СПД, и преобладающем Доплеровском механизме уширения. Были проведены расчеты и сопоставлены данные по различным механизмам уширения спектральных линий, при условиях, создающихся в СПД.

Натуральное уширение ($\Delta\lambda_N$) было определено как:

$$\Delta\lambda_N = \frac{\lambda^2}{2 \cdot \pi \cdot c \cdot \tau} \quad (2)$$

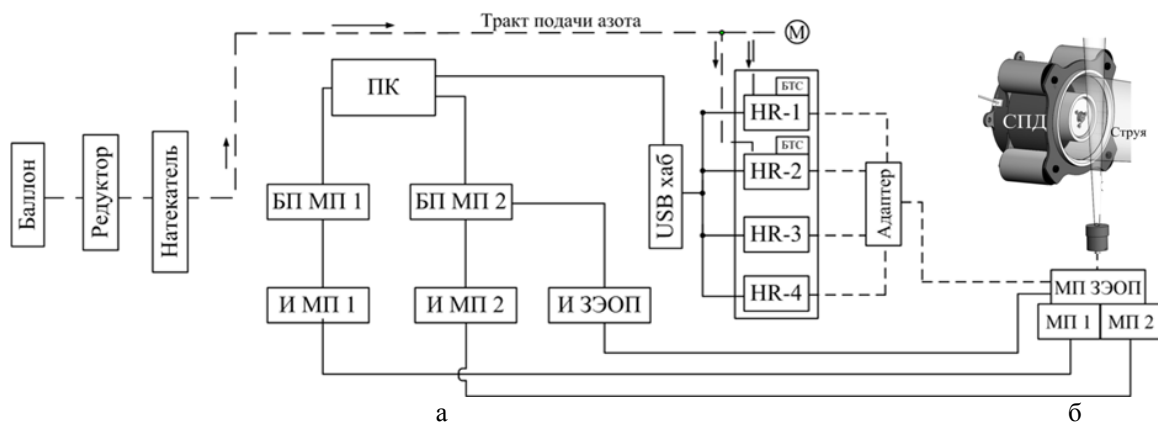


Рис. 1. Измерительный комплекс метода ОЭССК:

HR – спектрометры; ПК – компьютер; МП – механизмы перемещения; БП МП – блоки питания механизмов перемещения; И МП, И ЗЭОП – индикация положения ОП и индикация положения защитного экрана оптического приемника; М – манометр; USBхаб – разъем; БТС – блоки температурной стабилизации спектрометров

где τ – время жизни атома в возбужденном состоянии, с;

c – скорость света в вакууме, м/с.

Доплеровское уширение ($\Delta\lambda_D$):

$$\Delta\lambda_D = 7,16 \cdot 10^{-7} \cdot \lambda \cdot \sqrt{\frac{T}{M}}, \quad (3)$$

где T – температура, К; M – атомная масса, а.е.м.

Уширение спектральных линий давлением ($\Delta\lambda_P$):

$$\Delta\lambda_P = \frac{\lambda^2}{c} \cdot \frac{n \cdot \sigma}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot T}{M}}, \quad (4)$$

где n – концентрация атомов, см⁻³;

σ – эффективное сечение столкновений, см²;

k – константа Больцмана, 1,38 · 10⁻²³ Дж/К.

Резонансное уширение:

$$\Delta\lambda_R = 8,6 \cdot 10^{-30} \cdot \sqrt{\frac{g_m}{g_n}} \lambda^2 \cdot \lambda_R \cdot f_R \cdot N, \quad (5)$$

где f_r – сила осциллятора;

λ_r – длина волны резонирующей линии;

g_m, g_n – статические веса уровней;

N – заселенность основного уровня.

Расчетные величины уширения Штарка поданы в справочных данных.

Результаты расчетов сведены в таблице 1.

Получено, что в случае плазмы, рассматриваемого типа двигателя, наибольший вклад в профиль линии вводит Доплеровский механизм уширения. Следовательно, аппроксимация данных проводилась формулой Гаусса вида (6), где a, b и c – параметры аппроксимации:

$$I(\lambda) = a \cdot e^{-\frac{(x-b)^2}{2 \cdot c^2}}. \quad (6)$$

На рисунке 2 показаны результаты аппроксимации обоими указанными зависимостями, для линии иона ксенона 484,43 нм.

По данным по аппроксимации (см. рис. 2) очевидно, что формула Гаусса наиболее подходящим образом описывает поведение измеренных зависимостей.

Далее для нахождения интенсивности линии в ее пике I_{\max} , дифференцируется выражение (6) и приравняется к нулю (7).

$$\frac{d}{dx} \left(a \cdot e^{-\frac{(x-b)^2}{2 \cdot c^2}} \right) = a \cdot e^{-\frac{(x-b)^2}{2 \cdot c^2}} \cdot (2 \cdot b - 2 \cdot x) = 0. \quad (7)$$

Решая уравнение (7) определяется значение линии в максимуме. Алгоритм обработки данных для всех используемых в расчетах линий сохранился.

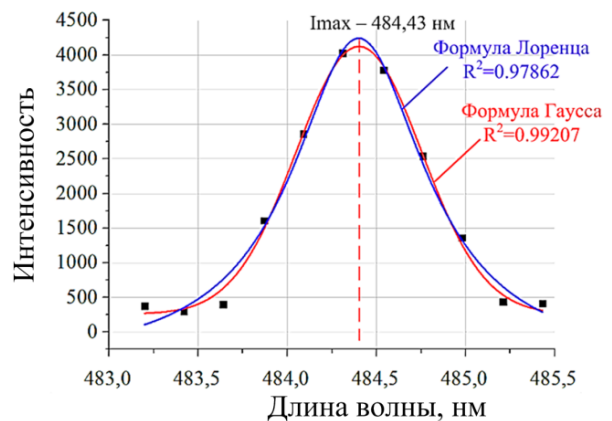


Рис. 2. Аппроксимация функцией Гаусса и Лоренца профиля линии с длиной волны 484,43 нм

2. Результаты

В результате измерений спектра СПД и расчета скорости эрозии получено, что на протяжении первых 1,5 часов работы СПД износ изоляторов РК упал на 60 %. Проведена линейная аппроксимация (8) для каждой группы данных измерений по 30 минут, при едином положении ЗЭОП, после 1,5 часов работы двигателя

$$f_i(t) = a_i + b_i \cdot t, \quad (8)$$

где $f_i(t)$ – аппроксимационная зависимость;

a, b – параметры аппроксимации; t – время, ч;

i – номер группы данных, $i=1, 2 \dots 6$.

Определены углы наклона каждой из аппроксимационных зависимостей $f_i(t)$ с осью Ox , рис. 3 и рис. 4.

Таблица 1

Расчетные данные по уширению спектральной линии бора на длине волны 249,77 нм

λ , нм	$\Delta\lambda_N$, нм	$\Delta\lambda_D$	$\Delta\lambda_R$	$\Delta\lambda_P$	$\Delta\lambda_{St}$	$\Sigma\Delta\lambda$, нм
249,77	$3,31 \cdot 10^{-6}$	0,129887	$1,49 \cdot 10^{-2}$	$6,1979 \cdot 10^{-7}$	$0,426 \cdot 10^{-3}$	0,129887

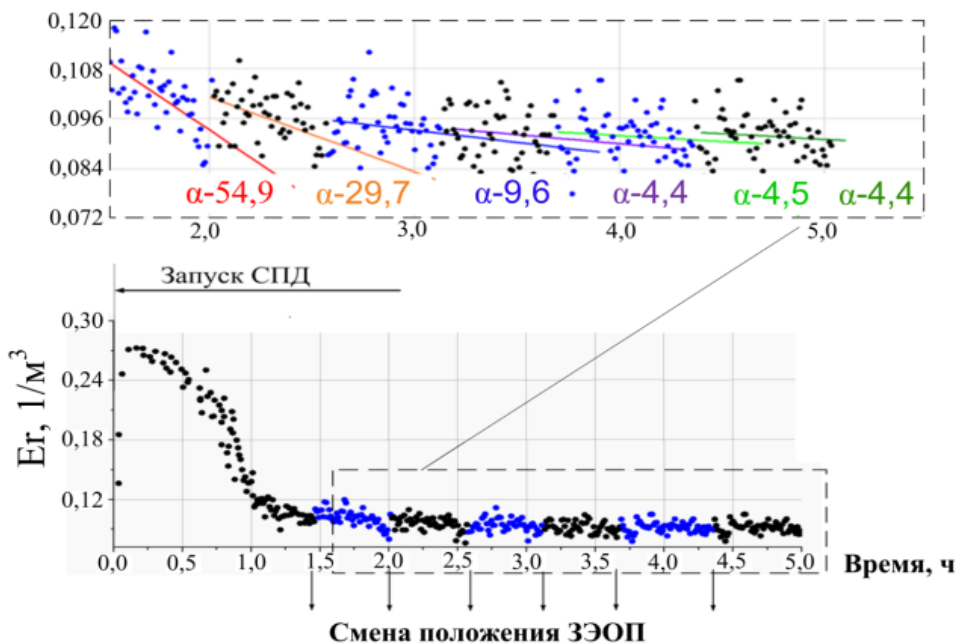


Рис. 3. Результаты измерений времени стабилизации скорости эрозии двигателя модели СПД-100 1,5 кВт

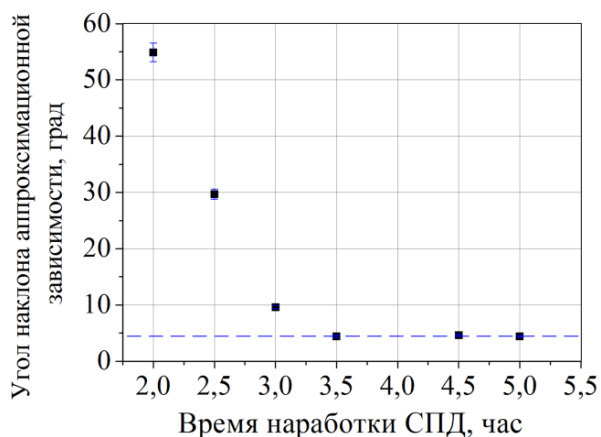


Рис. 4. Измерение угла наклона аппроксимационной зависимости скорости эрозии от времени

Очевидно, что чем больше износ изоляторов, тем больше загрязняется ЗЭОП. При постоянной скорости эрозии углы наклона аппроксимационных зависимостей $f_i(t)$ не претерпевают изменения.

В результате расчетов получено, что после 1,5 часов работы двигателя угол наклона аппроксимационной зависимости скорости эрозии с 55 градусов упал до 4,5 градусов за период 1,5...3 ч работы двигателя.

Анализ расчетно-экспериментальных данных показывает, что для рассматриваемой конструкции двигателя СПД 1,5 кВт на испытываемом режиме работы (напряжение разряда 300 В, массовый расход 4 мг/с) стабилизация скорости эрозии происходит после 3 часов работы СПД. На падение величи-

ны скорости эрозии оказывает влияние загрязнение ЗЭОП продуктами распыления двигателя. Результаты позволили сделать вывод, что к диагностическим экспериментам возможно приступать после 3 часов работы двигателя.

Заключение

Проведен эксперимент, целью которого являлось определение времени установления износа РК СПД с момента запуска двигателя.

В результате работы решен ряд задач. Разработан способ определения стабилизации скорости износа РК СПД мощности 1,5 кВт при измерениях методом ОЭССК. Расчетно-экспериментальным путем определено, что после 3 часов работы испытываемого СПД скорость износа изоляторов стабилизировалась. Из полученных результатов следует, что проведение исследований скорости эрозии методом ОЭССК, с целью количественной оценки износа стенок РК, возможно после 3 часов работы испытываемого СПД.

Литература

1. Горшков, О. А. Холловские ионные двигатели для космических аппаратов [Текст] / О. А. Горшков, В. А. Муравлев, А. А. Шагайда. – М. : Машиностроение, 2008. – 279 с.
2. Приданников, С. Ю. Исследование характеристик стационарных плазменных двигателей при длительной работе [Текст] : дис. ... канд. техн. наук :

05.07.05 / Приданников Сергей Юрьевич. – Калининград, 2003. – 203 с.

3. Rajput, R. U. Plasma plume diagnostics of low power stationary plasma thruster (SPT-20M8) with collisional radiative model [Text] / R. U. Rajput, A. N. Khaustova, A. V. Loyan // *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* – 2017. – № 78 (1). – 9 p.

4. Khaustova, A. N. Method for the erosion rate measurements of stationary plasma thruster insulators [Text] / A. N. Khaustova, A. V. Loyan // *Eastern-european journal of enterprise technologies.* – 2017. – № 3/5(87). – P. 11–17.

5. Хаустова, А. Н. Измерительный комплекс метода ОЭССК и методика диагностики износа кромок изолятора стационарного плазменного двигателя [Текст] / А. Н. Хаустова, О. П. Рыбалов // *Вестник двигателестроения.* – 2016. – № 2. – С. 212–220.

6. Хаустова, А. Н. Разработка оптического приемника для измерения скорости эрозии отдельно наружной и внутренней керамических вставок газоразрядной камеры стационарного плазменного двигателя [Текст] / А. Н. Хаустова, А. В. Лоян, О. П. Рыбалов // *Вестник двигателестроения.* – 2015. – № 2. – С. 29–36.

7. Максименко, Т. А. Исследование влияния материала разрядной камеры МСПД на его характеристики [Текст] / Т. А. Максименко, А. В. Лоян, В. А. Федотенко // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2007. – № 9 (45). – С. 144 – 146.

References

1. Horshkov, O. A., Muravlev, V. A., Shayda, A. A. *Khollovskie ionnye dvigateli dlya kosmicheskikh apparatov* [Hall ion thrusters for the spacecrafts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008. 279 p.

2. Prydannikov, S. Yu. *Yssledovaniye kharakterystyk statsyonarnikh plazmennikh dyhateley*

pry dlytel'noy rabote. Dys. kand. tekhn. nauk [Investigation of stationary plasma characteristics during long time operation. PhD Thesis]. Kaliningrad Publ., 2003. 203 p.

3. Rajput, R. U., Khaustova, A. N., Loyan, A. V. Plasma plume diagnostics of low power stationary plasma thruster (SPT-20M8) with collisional radiative model. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 2017, no. 78 (1). Available at: <https://www.epjap.org/articles/epjap/abs/2017/04/ap160348/ap160348.html> (accessed 22.06.2017).

4. Khaustova, A. N., Loyan, A. V. Method for the erosion rate measurements of stationary plasma thruster insulators. *Eastern-european journal of enterprise technologies*, 2017, no. 3/5 (87), pp. 11–17.

5. Khaustova, A. N., Rybalov, O. P. Izmeritel'nyi kompleks metoda OESSK I metodika diagnostiki iznosa kromok izolyatora statsionarnogo plazmennogo dvigatelya [OESSK method instrumentation facility and diagnostics method of stationary plasma thruster edge insulator wear]. *Vestnik dvigatelestroeniya*, 2016, no. 2, pp. 212–220.

6. Khaustova, A. N., Loyan, A. V., Rybalov, O. P. Razrabotka opticheskogo priemnika dlya izmereniya skorosti erozii otdel'no naruzhnoi I vnutrennei keramicheskikh vstavok gazorazryadnoi kamery statsionarnogo plazmennogo dvigatelya [Development of optical receiver for erosion rate measurements of gas discharge chamber external and internal ceramics separately]. *Vestnik dvigatelestroeniya*, 2015, no. 2, pp. 29–36.

7. Maksymenko, T. A. Loyan, A. V., Fedotenko, V. A. Yssledovaniye vlyaniya materyala razryadnoi kamery MSPD na eho kharakterystyky [Investigation of the influence of the discharge chamber material on MSPT characteristics]. *Avyatsyonno-kosmycheskaya tekhnika y tekhnolohyya*, 2007, no. 9 (45), pp. 144 – 146.

Поступила в редакцию 2.06.2017, рассмотрена на редколлегии 12.06.2017

Рецензент: д-р техн. наук, ст. науч. сотр., проф. каф. теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем Ю. А. Сыроев, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ДОСЛІДЖЕННЯ ШВИДКОСТІ ЕРОЗІЇ РК СПД 1,5 КВТ МЕТОДОМ ОЕССК У ЧАСІ

А. М. Хаустова, А. В. Лоян, Е. І. Іщенко

Вимірювання спектра випромінювання продуктів розпилення РК СПД, для кількісної оцінки швидкості ерозії ізоляторів анодного блоку двигуна, проводиться після повної стабілізації зносу РК в часі. Період встановлення швидкості ерозії РК залежить від передпускового стану двигуна і визначається експериментальним шляхом. У роботі показані дослідження залежності ерозії РК від часу СПД потужністю 1,5 кВт методом оптичної емісійної спектроскопії зі скануванням плазми двигуна через коліматор. Наведено результати визначення часу стабілізації зносу керамічних вставок СПД.

Ключеві слова: стаціонарний плазмовий двигун, ресурс, швидкість ерозії, оптична емісійна спектроскопія зі скануванням плазми двигуна через коліматор

**RESEARCH OF SPT 1.5 KW DC EROSION RATE
IN TIME WITH OESSC***A. N. Khaustova, A. V. Loyan, Ye. I. Ischenko*

Measurement of the radiation spectrum of the SPT DC sputtering products, for quantitative assessment of the anode block insulators erosion rate is performed after complete stabilization of the DC wear with time. DC erosion rate establishing period depends on the pre-launch state of the thruster and is determined experimentally. The paper shows research of SPT 1.5 kW power DC erosion with time by optical emission spectroscopy with the scanning of thruster plasma through a collimator. The results of the determination of the stabilization time of ceramic inserts of SPD are presented.

Keywords: stationary plasma thruster, lifetime, erosion rate, the optical emission spectroscopy with scanning of plasma through collimator

Хаустова Алена Николаевна – аспирант каф. 402 Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, email: khaustova@khai.edu.

Лоян Андрей Виталиевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотр., руководитель отделения МНТЦ КЭД ХАИ каф. 402 Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, email: a.loyan@khai.edu.

Ищенко Евгений Иванович – ст. науч. сотр. каф. 402 Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, email: a.loyan@khai.edu.

Khaustova Alyona Nikolaevna – postgraduate student of the engines and power plants of spacecraft department National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: khaustova@khai.edu.

Loyan Andrey Vitalievich – PhD, senior researcher, head of STC SPE KhAI of 402 of the engines and power plants of spacecraft department National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: a.loyan@khai.edu

Ischenko Evgenii Ivanovich – senior researcher of 402 of the engines and power plants of spacecraft department National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: a.loyan@khai.edu