

УДК 533.9.07

А. Н. ХАУСТОВА, А. В. ЛОЯН, О. П. РЫБАЛОВ

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОНЫ РЕГИСТРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРОДУКТОВ РАСПЫЛЕНИЯ РК СПД 1,5 КВТ

В работе показано, что для оценки скорости эрозии РК СПД методом оптической эмиссионной спектроскопии со сканированием плазмы двигателя через коллиматор, разработанным в лаборатории ЭРД ХАИ, требуется определение величины зоны регистрации излучения продуктов распыления стенок РК СПД. В работе приведено описание разработанного расчетно-экспериментального способа определения радиальной и продольной составляющей объемов излучения продуктов распыления изоляторов анодного блока СПД. Представлены результаты исследований величины зоны регистрации излучения продуктов распыления РК для двигателя СПД мощностью 1,5 кВт с керамическими изоляторами из нитрида бора предложенным способом.

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

Введение

Стационарные плазменные двигатели (СПД) успешно эксплуатируются в космосе уже не один десяток лет. Преимущества использования данного типа электроракетных двигателей заключается в практически полном обеспечении требований технического задания (ТЗ) к двигателям современных космических аппаратов. Одной из характеристик, которая не в полной мере удовлетворяет условиям ТЗ является ресурс СПД.

Результаты многочисленных испытаний различных конструкций СПД [1, 2] показали, что основным элементом, ограничивающим его ресурс, является изолятор разрядной камеры (РК). Высокоэнергетический ионный поток, вступает во взаимодействие с керамическими вставками РК и вызывает их распыление – эрозию [2].

Разработано многочисленное количество методов диагностики износа стенок РК СПД, обладающих рядом универсальных методологических особенностей. В лаборатории ЭРД ХАИ используют разработанный метод оптической эмиссионной спектроскопии со сканированием плазмы двигателя через коллиматор (ОЭССК) [3, 4], в силу ряда преимуществ данного метода [5].

Базой разработанного метода ОЭССК является оптическая эмиссионная спектроскопия. Усовершенствование конструкции оптического кабеля, за счет установки коллиматора, и метода обработки экспериментальных данных, позволило определять скорость эрозии кромок отдельно каждой из керамических вставок непосредственно в процессе испытаний двигателя [4, 5].

1. Схема расчета

Согласно схеме испытаний метода ОЭССК [4] после регистрации спектра СПД в диапазоне 240...850 нм, производится обработка зарегистрированного сигнала с целью расшифровки спектра и определения интенсивностей линий нейтрального (I^{Xe}) и ионизированного (I^{Xe+m}) ксенона на длинах волн 828 и 484 нм, и нейтрального бора (I^B) – 249, 77 нм. Далее [5] последует определение скорости эрозии согласно следующему алгоритму расчета.

Поток массы (\dot{m}_B), уносимый с поверхности кромки изолятора, прямо пропорционален концентрации атомов:

$$\dot{m}_B = m_0 N_{B0} S_{KP} V_B \propto N_{B0}, \quad (1)$$

где m_0 – масса одной частицы вещества (к примеру, бора);

N_{B0} – концентрация атомов бора на основном невозбужденном уровне;

S_{KP} – площадь износа кромки изолятора;

V_B – среднемассовая скорость потока распыленных частиц.

Уравнение неразрывности для потока продуктов распыления изоляторов – атомов бора:

$$\frac{\partial N_{B0}}{\partial t} + \bar{v} \cdot (N_{B0} \bar{v}_{B0}) = K_B N_e N_{B0} - v_B N_B, \quad (2)$$

где N_B – концентрация атомов бора на возбужденном уровне;

\bar{v}_{B0} – средняя скорость атомов бора на основном невозбужденном уровне;

v_B – частота излучения одного атома бора при переходе с возбужденного на основной уровень;

K_B – сумма коэффициентов скоростей возбуждения атомов бора;

N_e – концентрация электронов.

Можно полагать, что при стационарном режиме работы двигателя, за время проведения измерений, массоунос с поверхности изоляторов не изменяется. Исходя из этого, из уравнения неразрывности можно определить баланс между процессами возбуждения и релаксации для атомов бора как:

$$K_B N_e N_{B0} = v_B N_B. \quad (3)$$

По определению интенсивность спектральной линии атомов бора с единичного объема излучения плазмы:

$$J_B = \varepsilon_B K_B N_e N_{B0}. \quad (4)$$

Из (4) следует, что интенсивность спектральной линии пропорциональна числу частиц (концентрации). Следовательно, скорость массоуноса бора выражена через интенсивность спектральной линии бора как:

$$\dot{m}_B \propto N_{B0} \propto J_B \frac{1}{\varepsilon_B K_B N_e}. \quad (5)$$

Для определения износа стенок РК с использованием выражения (5) потребовалось нахождение концентрации электронов, которое было найдено через соотношение спектральных линий атомарного (6) и ионизированного (7) ксенона.

Выражение для интенсивности спектральной линии нейтрального ксенона:

$$J_{Xe} = \varepsilon_{Xe} K_{Xe} N_e N_{Xe0}. \quad (6)$$

Интенсивность спектральной линии метастабильного иона ксенона:

$$J_{Xe+m} = \frac{\varepsilon_{Xe+m} K_{Xe+} N_e^2 K_i N_{Xe0} b}{V_{is}}, \quad (7)$$

где ε_B , ε_{Xe} , ε_{Xe+m} – энергия излучения бора, атома и метастабильного иона ксенона;

N_{Xe0} – концентрация атомов ксенона на основном невозбужденном уровне;

K_{Xe} , K_{Xe+} – сумма коэффициентов скоростей возбуждений уровней атома и иона ксенона;

K_i – коэффициент ионизации;

V_{is} – ионно-звуковая скорость;

b – ширина канала СПД;

Исходя из (6) и (7) определена концентрация электронов как:

$$N_e = \frac{\varepsilon_{Xe} K_{Xe} V_{is}}{\varepsilon_{Xe+m} K_{Xe+} K_i b} \frac{J_{Xe+m}}{J_{Xe}}. \quad (8)$$

Из (4) и (9) поток массы уносимой с поверхности кромок изолятора РК:

$$\dot{m}_B = \frac{\varepsilon_{Xe+m} K_{Xe+} K_i b}{\varepsilon_B K_B \varepsilon_{Xe} K_{Xe} V_{is}} I^B \frac{R_B^2}{V_{B_изл}} \frac{I^{Xe}}{I^{Xe+m}}, \quad (9)$$

где $V_{B_изл}$ – область излучения бора;

R_B – расстояние от источника излучения до приемника излучения.

Определив соотношения спектральных констант (K_B , K_{Xe} , K_{Xe+} , ε) и параметры плазмы в области близ стенок РК (V_{is} , K_i) выражение (1) преобразовано как (10):

$$\dot{m}_B \propto N_B \propto E_r = I^B \frac{R_B^2}{V_{B_изл}} \frac{I^{Xe}}{I^{Xe+m}}, \quad (10)$$

где E_r – скорость эрозии изолятора;

В выражении (2) потребовалось определение объемов излучения продуктов распыления изоляторов V_B , которое было произведено расчетно-экспериментальным способом при помощи разработанного измерительного комплекса метода ОЭССК [3] для двигателя СПД мощностью 1,5 кВт, разработана лаборатория ЭРД ХАИ.

Как было показано в [5] объемы излучения изоляторов были определены по выражениям (11):

$$V_{ни} = (\pi D_{ни}^2 - \pi(D_{ни} - r_{н})^2) \cdot (L_{ни} + z_{н}), \quad (11)$$

$$V_{ви} = (\pi(D_{ви} + r_{в})^2 + \pi D_{ви}^2) \cdot (L_{ви} + z_{в}),$$

где $V_{ни}$, $V_{ви}$ – объем излучения наружного и внутреннего изоляторов, соответственно;

$D_{ни}$, $D_{ви}$ – внутренний диаметр наружного изолятора и наружный диаметр внутреннего изолятора, соответственно;

$r_{н}$, $r_{в}$, $z_{н}$, $z_{в}$ – радиальный и продольный размеры внутреннего и наружного изоляторов, соответственно.

Величины $r_{н}$, $r_{в}$, $z_{н}$, $z_{в}$ были определены расчетно-экспериментальными путями.

2. Схема эксперимента

Эксперимента проведен с двигателем СПД 1,5 кВт с керамическими изоляторами из нитрида бора (BN) при номинальном режиме работы: напряжении разряда – 300 В, анодном массовом расходе – 4 мг/с. Токи обеих катушек выбирались из условия минимального разрядного тока, и составили 5 и 5 А.

Для измерений радиального размера ($r_{н}$, $r_{в}$) ОП устанавливался под углом к срезу двигателя, и проводилось сканирование спектра СПД от наружного до внутреннего изолятора, рисунок 1 а. Для определения продольной составляющей ($z_{н}$, $z_{в}$) ОП устанавливался перпендикулярно срезу двигателя, напротив каждой из стенок РК и сканирование проводилось по направлению оси СПД, рисунок 1 б.

Полученные данные измерений и расчетов приведены на рисунке 2.

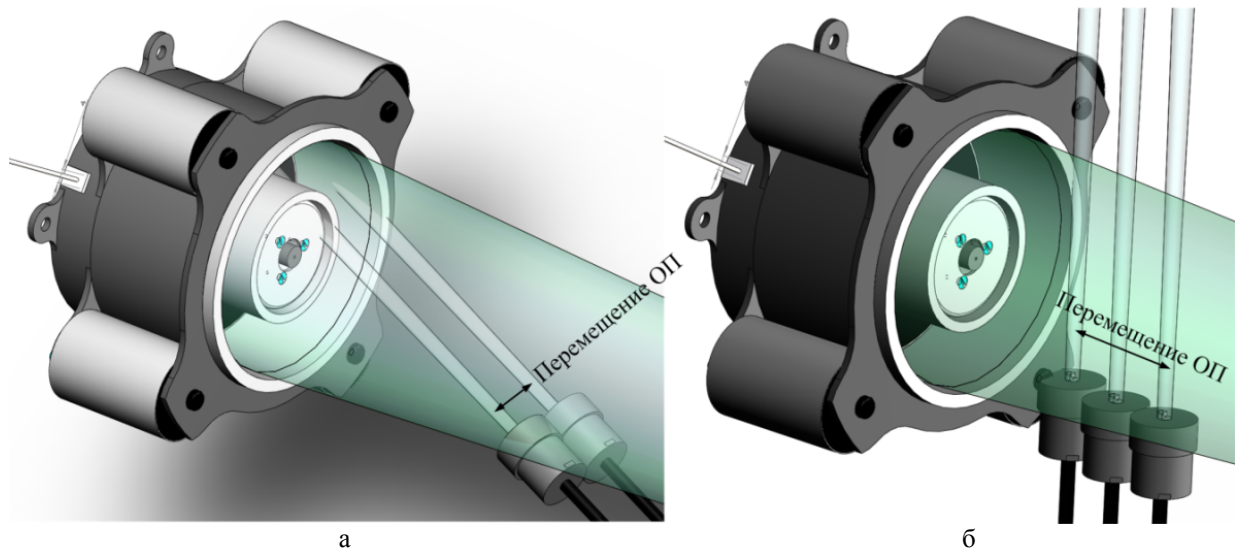


Рис. 1. Схема измерений величины зоны регистрации излучения бора в РК и за срезом двигателя модели СПД-100 1,5 кВ: а – измерения радиальной составляющей; б – измерение продольной составляющей

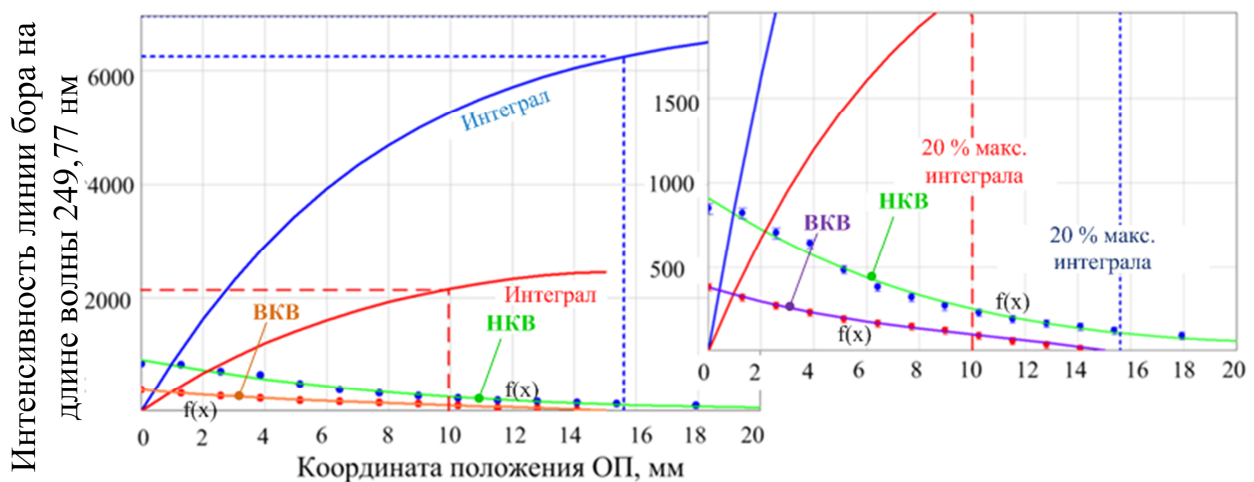


Рис. 2. Результаты измерений продольных размеров областей излучения с изоляторов: ВКВ – внутренняя керамическая стенка РК СПД; НКВ – наружная керамическая стенка РК СПД; $f(x)$ – аппроксимационные зависимости

3. Результаты

Для обработки экспериментальных данных была использована следующая схема расчета. Как видно по рисунку 2 с отдалением от среза двигателя интенсивность спектральной линии бора снижается. Для внутреннего изолятора на расстоянии 15 мм от среза двигателя линия с длиной волны 249,77 нм уже не регистрируется. Для наружного – на расстоянии более 20 мм. Данные были аппроксимированы полиномом третьей степени (12):

$$f(x) = a + bx + cx^2 + dx^3, \quad (12)$$

где $f(x)$ – аппроксимационная зависимость;

x – координата положения оптического приемника (ОП) относительно среза двигателя;

a, b, c, d – параметры аппроксимации.

Далее был определен интеграл Int зависимости $f(x)$ (13):

$$Int = \int f(x)dx = \frac{dx^4}{4} + \frac{cx^3}{3} + \frac{bx^2}{2} + ax. \quad (13)$$

Определена координата x_{max} , при которой интеграл Int достигает максимального значения, из уравнения (14):

$$\frac{dx_{max}^4}{4} + \frac{cx_{max}^3}{3} + \frac{bx_{max}^2}{2} + ax_{max} = 0. \quad (14)$$

Найдено значение функции Int_{\max} , в координате x_{\max} , при которой функция Int достигает максимального значения, рис. 2.

Величина z , продольный размер области излучения, определён как 20 % от максимального значения интеграла Int_{\max} (15):

$$z = 0,8 \cdot \text{Int}_{\max} \quad (15)$$

Подобным образом проводились расчеты всех линейных размеров объемов излучения для каждой из керамических вставок РК.

Получено, что при выбранном режиме работы двигателя продольные размеры составляют: для внутреннего изолятора – 15,6 мм, для наружного изолятора – 10,4 мм; радиальные: для внутреннего изолятора – 5,9 мм, для наружного изолятора – 5,1 мм.

Определены относительные погрешности измерений линейных размеров областей излучения продуктов распыления изоляторов согласно методика приведенной в [6]. Получено, что относительная погрешность измерений объемов излучения (11) составляет $\pm 1,8\%$.

С использованием полученных данных проведены расчеты объемов излучения наружного и внутреннего изоляторов ($V_{\text{ни}}, V_{\text{ви}}$), согласно выражениям (11), которые в дальнейшем применены для определения скорости эрозии отдельно для каждой стенки РК СПД [5].

Заключение

Проведен эксперимент, целью которого являлось определение радиальной и продольной составляющей объемов излучения наружного и внутреннего изоляторов, которые в дальнейшем использованы для количественной оценки скорости эрозии стенок РК СПД.

В результате работы решен ряд задач. Разработан способ определения объемов излучения наружного и внутреннего изоляторов при помощи измерительного комплекса метода ОЭССК.

Расчетно-экспериментальным путем определено, что на режиме работы испытываемого СПД мощностью 1,5 кВт при токах наружной и внутренней катушек равных 5 А, продольные размеры областей излучения составляют: для внутреннего изолятора – 15,6 мм, для наружного изолятора – 10,4 мм; радиальные: для внутреннего изолятора – 5,9 мм, для наружного изолятора – 5,1 мм.

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. *Issledovanie kharakteristik statsionarnykh plazmennyykh dvigatelei pridlitel'noi rabote* [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.07.05 / Приданников Сергей Юрьевич. – Калининград, 2003. – 203 с.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Хаустова, А. Н. Испытания измерительного комплекса метода ОЭССК и определение погрешности расчета относительной эрозии [Текст] / А. Н. Хаустова // Авиационно-космическая техника и технология. – 2016. – № 7 (134). – С. 121 – 126.

References

1. Horshkov, O. A., Muravlev, V. A., Shahayda, 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 statsyonarnykh plazmennyykh dvigateley pry dlytel'noy rabote*. Diss. kand. tekhn. nauk [Investigation of stationary plasma characteristics during long time operation. PhD Thesis]. Kaliningrad, 2003. 203 p.
3. 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.
4. 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.

5. Khaustova, A. N., Loyal, 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.

6. Khaustova, A. N. Ispytaniya izmeritel'nogo kompleksa metoda OESSK I opredelenie pogreshnosti

rascheta odnositel'noi erozii [Testing of OESSK method measuring complex and determination of relative erosion calculation error]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2016, no. 7 (134), pp. 121–126.

Поступила в редакцию 24.03.2017, рассмотрена на редколлегии 9.06.2017

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗОНИ РЕЄСТРАЦІЇ ВИПРОМІНЮВАННЯ ПРОДУКТІВ РОЗПИЛЕННЯ РК СПД 1,5 КВТ

А. Н. Хаустова, А. В. Лоян, О. П. Рыбалов

У роботі показано, що для оцінки швидкості ерозії РК СПД розробленим методом оптичної емісійної спектроскопії зі скануванням плазми двигуна через коліматор, розробленим в лабораторії ЕРД ХАІ, вимагається визначення величини зони реєстрації випромінювання продуктів розпилення стінок РК СПД. В роботі наведено опис розрахунково-експериментального метода визначення радіальної і поздовжньої складової обсягів випромінювання продуктів розпилення ізоляторів анодного блоку СПД. Представлені результати досліджень величини зони реєстрації випромінювання продуктів розпилення РК для двигуна СПД потужністю 1,5 кВт з керамічними ізоляторами із нітриду бора запропонованим способом.

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

INVESTIGATION OF 1.5 KW SPT DC SPUTTERING PRODUCTS RADIATION REGISTRATION REGION

A. N. Khaustova, A. V. Loyal, O. P. Ribalov

In the article it is shown that to determine SPT DC erosion rate by method of optical emission spectroscopy with scanning of the plasma through collimator, that was developed in EP laboratory KhAI, it is required to measure the value of the radiation registration region of the sputtering products of the DC surface walls. Description of the calculation and experimental method for determination of radial and longitudinal components of the radiation volumes of the SPT anode block insulators sputtering products are presented. Investigation results of the radiation detection zone size of the DC sputtering products for a 1.5 kW power thruster with the ceramic insulators from boron nitride with the proposed method are presented.

Keywords: stationary plasma thruster, lifetime, erosion rate, the optical emission spectroscopy with the 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.

Рыбалов Олег Петрович – 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.

Loyal Andrei 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.

Ribalov Oleg Petrovich – 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.