

УДК 533.9.07

А. Н. ХАУСТОВА

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

ИСПЫТАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА МЕТОДА ОЭССК И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ РАСЧЕТА ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ЭРОЗИИ

В статье показано, что при длительных измерениях методом ОЭССК наблюдается стабильное падение сигнала, регистрируемого оптическим приемником. Данный процесс вызван запылением защитного экрана продуктами эрозии конструкции двигателя и оптического приемника. Представлены результаты эксперимента, целью которого являлось измерение скорости падения коэффициента пропускания оптического приемника. Представлены результаты времени, при котором падение коэффициента пропускания защитного экрана не наблюдается. Показан расчет погрешностей измерений методом оптической эмиссионной спектроскопии со сканированием плазмы двигателя через коллиматор для каждого из исследуемых диапазонов.

Ключевые слова: *стационарный плазменный двигатель, скорость эрозии, оптическая эмиссионная спектроскопия*

Введение

Оптическая эмиссионная спектроскопия (ОЭС) является универсальным, бесконтактным методом, который применяется при исследовании скорости эрозии деталей конструкции стационарного плазменного двигателя (СПД) [1]. ОЭС вызывает большой интерес из-за ряда преимуществ [2], основным из которых является возможность измерения непосредственно во время работы двигателя, чего не позволяют весовые, профилометрические и другие широко используемые методы. Наряду с этим главным недостатком ОЭС является измерение интегральных характеристики, т.е. среднее значение интенсивностей линий со всего объема излучения двигателя. Процессы, происходящие в СПД, зависят как от конструктивного исполнения двигателя, так и от управляющих факторов: токов катушек (соответственно магнитного поля), параметров разряда и массового расхода. Требуется понимание того, каким образом изменение того или иного фактора повлияет на ресурсные характеристики отдельных элементов конструкции СПД. К примеру, в работе [3] показано, что изменяя магнитное поле двигателя, можно увеличить или уменьшить массоунос материалов керамических изоляторов разрядной камеры (РК). Для исследования этого, наряду с интегральными необходимо проводить и локальные измерения, чего не позволяет метод ОЭС.

В связи с этим, в лаборатории ЭРД ХАИ был разработан метод оптической эмиссионной спектроскопии со сканированием плазмы двигателя через коллиматор (ОЭССК) [2]. Основной принцип данно-

го метода состоит в измерении спектра из узкой области излучения, для получения локальных характеристик относительной скорости эрозии плазмы.

В процессе проведения испытаний метода ОЭССК было отмечено, что через некоторый промежуток времени величина регистрируемого сигнала падает во всем спектральном диапазоне [2]. Была выдвинута и впоследствии проверена гипотеза о том, что падение интенсивностей линий, происходит по причине запыления ОП эродирующими материалами конструкции двигателя и защитных экранов ОП [4]. Конструкция ОП была укомплектована рядом защитных экранов из кварцевого стекла [4]. В результате воздействие процесса запыления ОП было сведено к минимуму. Однако, очевидно, что полностью исключить этот эффект не представляется возможным. Следовательно, экспериментальным путем требуется определить время, за которое падение коэффициента пропускания ОП не наблюдается и погрешности измерений интенсивностей линий и расчета относительной скорости эрозии.

1. Испытания измерительного комплекса

Измерительный комплекс метода ОЭССК представляет собой спектральный блок (1), находящийся вне вакуумной камеры (6); оптический приемник (ОП) и двух координатный механизм перемещения (МП) ОП (5), рисунок 1. ОП (4) включает в себя МП (10) подвижного защитного экрана (7), коллиматор (8) и кабель из четырех оптических волокон (2). Для определения времени падения ко-

эфициента пропускания подвижного защитного экрана оптического кабеля (7) был проведен эксперимент с СПД мощностью 650 Вт на номинальном режиме работы ($U_d - 380 \text{ В}$, $I_d - 1,7 \text{ А}$, $\dot{m} - 1,6 \text{ мг/с}$) методом ОЭССК.

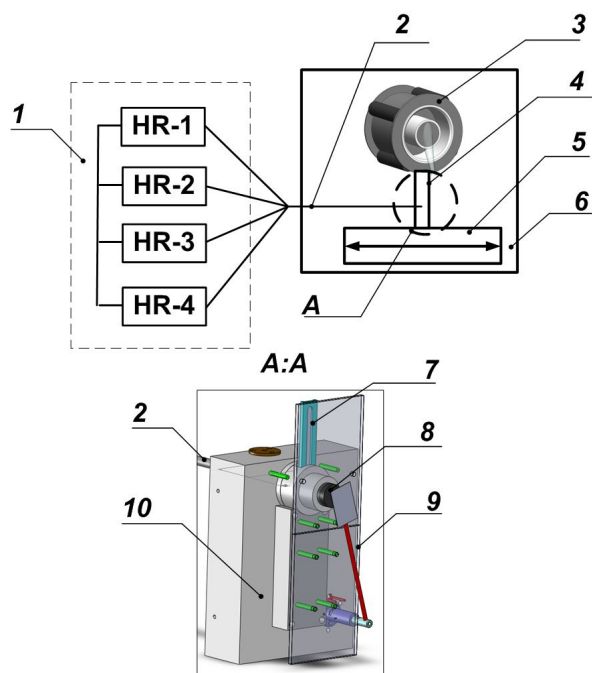


Рис. 1. Измерительный комплекс метода ОЭССК:
1 – спектральный блок; 2 – оптический кабель;
3 – СПД; 4 – оптический приемник (ОП);
5 – механизм перемещения ОП; 6 – вакуумная камера;
7 – подвижный защитный экран оптического кабеля;
8 – коллиматор; 9 – стационарные защитные экраны ОП

Схема эксперимента представлена на рисунке 2. ОП устанавливался в стационарном положении.

В области приема излучения находился наружный изолятор газоразрядной камеры СПД.

После выхода двигателя на стационарный тепловой режим, при котором параметры разряда и интенсивности спектральных линий стабилизированы, последовательно произведено 70 измерений спектра без перемещения защитного экрана [4]. Одновременно измерения проводились во всем спектральном диапазоне 240...850 нм, для получения данных о поведении интенсивностей линий во времени, использующихся для расчета относительной скорости эрозии: линия бора (В) с длиной волны 249,77 нм, а также для линий ксенона (Хе) - 484,433 нм и 828,57 нм.

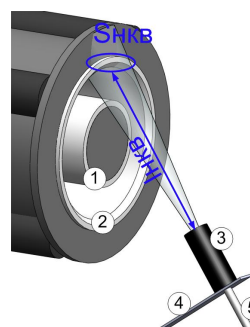


Рис. 2. Положение оптического приемника относительно СПД: 1 – внутренний изолятор ГРК; 2 – наружный изолятор ГРК (НКВ); 3 – коллиматор; 4 – защитный экран; 5 – оптический кабель

На рисунке 3, верхний, представлена зависимость интенсивностей линии бора во времени. Масштаб рисунка не позволяет визуально отследить поведение зависимости вначале измерений. Для этого, ось абсцисс была переведена в логарифмический масштаб, рис. 3 нижний.

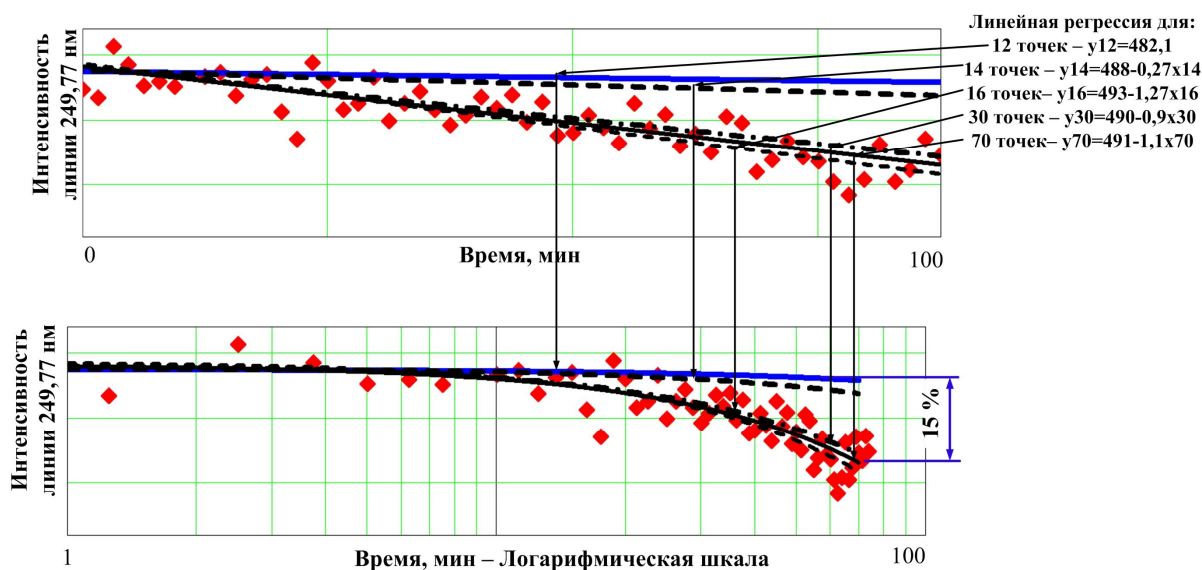


Рис. 3. Изменение интенсивности спектральной линии бора во времени

Визуально отслеживается, что на первых минутах измерений зависимость интенсивности от времени имеет прямолинейный характер. Однако на 70 минуте измерений величина сигнала снизилась на 15 %. По полученным данным были проведены линейные регрессии для 5, 10, 12, 14, 16, 30 и 70 точек. Для 5, 10 и 12 точек регрессионная зависимость параллельна оси Ох. С увеличением количества точек 14, 16 и т. д. постепенно уменьшается тангенс угла наклона между функций регрессии и осью Ох, рис. 3. Для того чтобы понять в какой момент времени началось падение коэффициента пропускной способности экрана была найдена точка пересечения регрессионной зависимости для 12 и 70 измерений, рис. 4. Рассчитано, что искомое время составляет 8 минут.

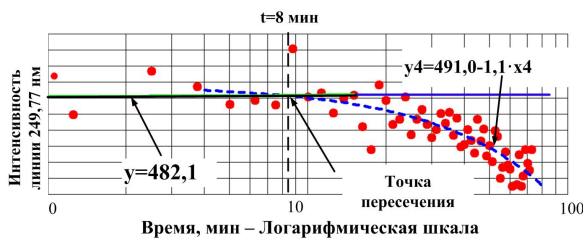


Рис. 4. Изменение интенсивности спектральной линии бора 249,77 нм во времени

Для подтверждения корректности проведенных измерений и расчетов, на рисунке 5 показана гистограмма и распределение Гаусса среднеквадратической погрешности измеряемой интенсивности от регрессионной кривой. Получено, что среднеквадратические погрешности имеют нормальный закон распределения, следовательно, расчеты произведены корректно.

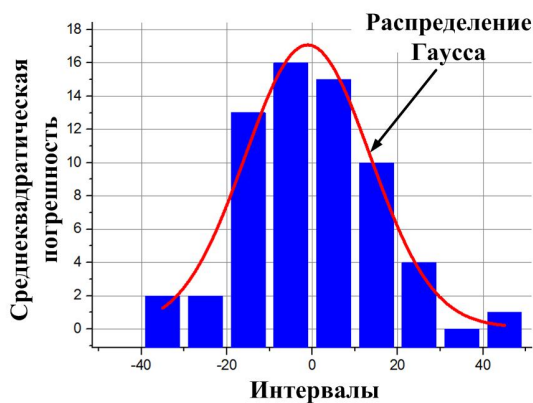


Рис. 5. Распределение среднеквадратической погрешности

Аналогичные измерения и, соответственно, расчеты были проведены также для линий ксенона с длиной волны 484,433 нм, рис. 6., и 828,57 нм, рис. 7., так как эти линии используются, в качестве

опорных, при расчете относительной скорости эрозии.

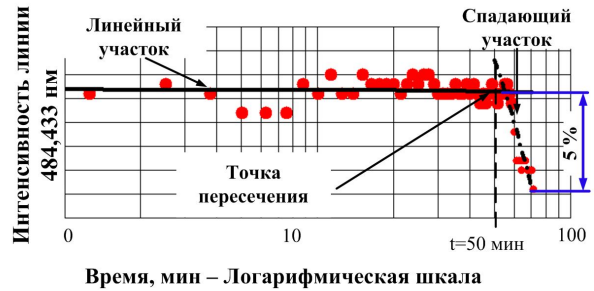


Рис. 6. Изменение интенсивности спектральной линии иона ксенона во времени

При сравнении результатов приведенных на рисунке 5 и рисунках 6, 7 видно, что продолжительность линейного участка зависимостей интенсивности от времени для линий ксенона в несколько раз больше, чем для бора. Падение коэффициента пропускания для линии с длиной волны 484,433 нм, находящейся в видимом спектральном диапазоне, начинается после 50 минут измерений, для линии 828,57 нм с длиной волны, находящейся в инфракрасном спектральном диапазоне, - после 30 минут измерений. После 70 минут измерений величина сигнала обеих линий ксенона упала на 5...6 %. Из этого следует то, что в различных спектральных диапазонах коэффициент пропускной способности защитного экрана изменяется по-разному. В дальнейшем, это будет учитываться при расчете относительной скорости эрозии, т.к. не пропорциональное изменение регистрируемого сигнала будет приводить к погрешностям расчетов и, соответственно, повлечёт ошибочные выводы при анализе результатов.

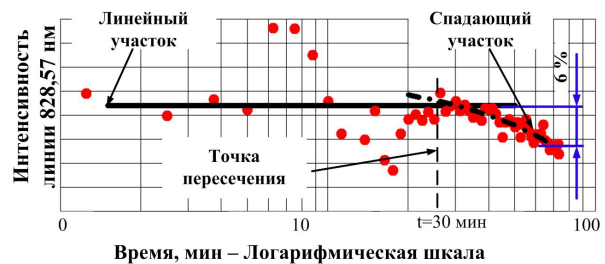


Рис. 7. Изменение интенсивности спектральной линии ксенона во времени

2. Расчет погрешности измерений

После получения выше приведенных результатов стал вопрос о том, какова величина погрешности измерений до начала фиксации запыления защитного стекла. С учетом малой интенсивности линии

бора, из-за малых скоростей эрозии изоляторов разрядной камеры, ее регистрация проводится при времени выдержки равном 40 с. Легко вычислить, что за 8 минут можно произвести 12 измерений. Из полученных данных выбрано первые 12 последовательно измеренных точек, при которых пропускная способность экрана не изменяется. Рассчитано среднее квадратическое отклонение σ^λ (2) и доверительные интервалы $3 \cdot \sigma^\lambda$.

$$\sigma^\lambda = \sqrt{\left(\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (I_i^\lambda - \bar{I})^2\right)}, \quad (2)$$

где n – количество измерений;

I_i^λ – i -е значение интенсивности;

\bar{I} – среднее значение интенсивности по всем измерениям.

В доверительный интервал $3 \cdot \sigma^\lambda$ попало 8 измерений из 12 точек. По оставшимся точкам было повторно рассчитано среднее квадратическое отклонение, которое используется при расчете погрешностей далее.

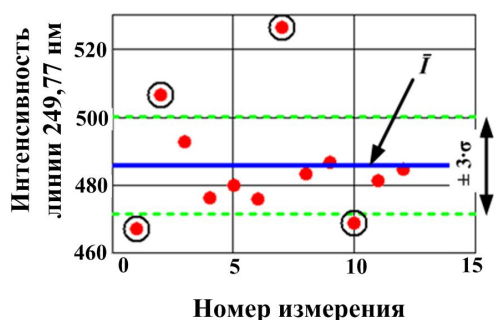


Рис. 8. Значения интенсивностей в пределах доверительного интервала

Также рассчитаны средние значения для 2, 3 и т.д. измерений. Как показано на рисунке 9 с увеличением количества измерений данные стремятся к их среднему значению, следовательно, расчеты были произведены корректно.

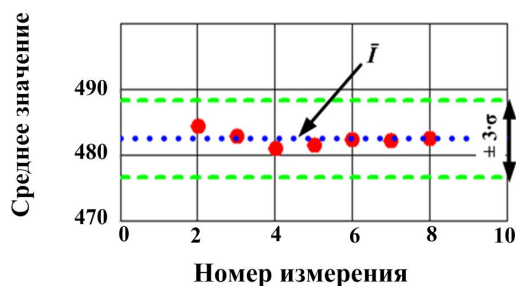


Рис. 9. Зависимость среднего значения интенсивности от номера осреднения

Согласно [6] определены абсолютная (3)

$$\Delta I = ts \cdot \sigma^\lambda, \quad (3)$$

где ΔI – абсолютная погрешность;

ts – коэффициент Стьюдента;

и относительная (4) погрешности измерений для каждой из выше упомянутых линий:

$$\varepsilon I = \frac{\Delta I}{I} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где εI – относительная погрешность, %. Аналогичные расчеты была проведены также для линии иона ксенона с длиной волны 484,43 нм и атома ксенона – 828,57 нм. В таблице 1 приведены погрешности измерений.

Таблица 1
Погрешности измерений

Длина волны λ , нм	Абсолютная погрешность ΔI	Относительная погрешность εI , %
249,77	4,5	0,94
484,43	11,1	0,73
828,57	15,9	0,46

С учетом полученных значений, был произведен расчет погрешности относительной скорости эрозии, вычисляемой по формуле (5) [5]:

$$E_{rB} = \frac{I_{249,77}^B \cdot I_{828,57}^{Xe}}{I_{484,433}^{Xe+}}. \quad (5)$$

Абсолютная погрешность измерения относительной эрозии вычисляется как:

$$\Delta E_{rB} = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial E_{rB}}{\partial I_i} \cdot \Delta I\right)^2}. \quad (6)$$

Относительная погрешность:

$$\varepsilon E_{rB} = \frac{\Delta E_{rB}}{E_{rB}} \cdot 100\%. \quad (7)$$

Относительная погрешность расчета эрозии составила 2 %.

Заключение

В результате работы был проведен эксперименты, целью которого являлось определение скорости деградации пропускной способности подвижного защитного экрана оптического кабеля. По результатам эксперимента получено, что по прохождении 8 мин. наблюдает постепенное падение регистрируемого сигнала во всем спектральном диапазоне. Также отмечено, что для различных линий

коэффициент пропускной способности защитного экрана различный.

Рассчитаны погрешности измерений для линии бора с длиной волны 249,77 нм, атомарного и ионизированного ксенона с длинами волн 484,433 нм и 828,57 нм соответственно.

Рассчитано, что 12 измерений спектра достаточно, так как относительная погрешность расчета скорости относительной эрозии составляет не более 2 %.

Литература

1. Хаустова, А. Н. Исследование струи spd-70 методом оптической эмиссионной спектроскопии со сканированием плазмы через коллиматор [Текст] / А. Н. Хаустова // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2015. – № 10 (127). – С. 102–105.

2. 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.

3. Приданников, С. Ю. Исследование характеристик стационарных плазменных двигателей при длительной работе [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.07.05 / Приданников Сергей Юрьевич. – Калининград. – 2013. – 203 с.

4. Хаустова, А. Н. Разработка спектрального комплекса высокого разрешения для исследования спектра стационарного плазменного двигателя [Текст] / А. Н. Хаустова // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2015. – № 9(126). – С. 113–118.

5. Максименко, Т. А. Исследование влияния повышения тягового КПД СПД малой мощности на ресурсные характеристики [Текст] / Т. А. Максименко, А. В. Лоян, В. А. Федотенко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – № 9 (45). – С. 144–146.

6. Миронов, Э. Г. Методы и средства измерений [Текст] : учеб. пособие / Э. Г. Миронов. – Екатеринбург, 2009. – 462 с.

References

1. Khaustova, A. N. Issledovanie strui spd-70 metodom opticheskoi emissionnoi spektroskopii so skanirivaniem plazmy cherez kollimator [Investigation of spt-70 plume by means of optical emission spectroscopy meethod with the scanning of plasma through collimator]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2015, no. 10 (127), pp. 102-105.

2. 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 stacionarnogo plazmennogo dvigatelya [Development of optical reciever for erosion rate measurements of gass discharge chamber external and internal ceramics separately]. *Vestnik dvigatelestroeniya*, 2015, no. 2, pp. 29-36.

3. Pridannikov, S. Y. Issledovanie kharakteristik stacionarnykh plazmennykh dvigatelei pri dlitel'noi rabote. Dis. kand. tekhn. nauk [Research of stationary plasma thruster characteristics under long term of operation. PhD thesis]. Kaliningrad, 2013. 203 p.

4. Khaustova, A. N. Razrabotka spektral'nogo kompleksa vysokogo razresheniya dlya issledovaniya spektra stacionarnogo plazmennogo dvigatelya [Development of high resolution spectral complex for the stationary plasma thruster spectrum research]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2015, no. 9 (126). pp. 113-118.

5. Maksimenko, T. A., Loyan, A. V., Fedotenko, V. A. Issledovanie vliyaniya povysheniya tyagovogo KPD SPD maloi moshchnosti na resursnye kharakteristiki [Research of low power SPT efficiency coefficient influence on resource characteristics]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2007, no 9 (45). pp. 144-146.

6. Mironov, E. G. *Metody i sredstva izmerenii* [Measuring methods and instruments]. Ekaterinburg, 2009. 462 p.

Благодарность

Автор выражает искреннюю благодарность за полезные дискуссии при подготовке статьи Лояну Андрею Витальевичу канд. техн. наук, ст. науч. сотр. каф. 402, нач. отдела ЭРДУ МНТЦ КЭД Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ».

Поступила в редакцию 12.05.2016, рассмотрена на редколлегии 15.06.2016

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

**ВИПРОБУВАННЯ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ МЕТОДУ ОЕССК
ТА РОЗРАХУНОК ПОХИБКИ РОЗРАХУНКУ ВІДНОСНОЇ ЕРОЗІЇ***О. М. Хаустова*

У статті показано, що при тривалих вимірюваннях методом ОЕССК спостерігається стабільне падіння сигналу, що реєструється оптичним приймачем. Даний процес викликаний запиленням захисного екрану продуктами ерозії конструкції двигуна. Представлені результати експерименту, метою якого було вимірювання швидкості падіння коефіцієнта пропускання оптичного приймача. Представлені результати обчислення максимально можливого часу проведення вимірювань, при якому падіння коефіцієнта пропускання захисного екрану не спостерігається. Показаний розрахунок похибок вимірювань методу оптичної емісійної спектроскопії зі скануванням плазми двигуна через коліматор для кожного з досліджуваних діапазонів.

Ключеві слова: стаціонарний плазмовий двигун, швидкість ерозії, оптична емісійна спектроскопія

**TESTING OF OESSK METHOD MEASURING COMPLEX
AND DETERMINATION OF RELATIVE EROSION CALCULATION ERROR***A. N. Khaustova*

It is shown in the article that during the long-term measurements by mean OESSK method stable signal drop that is detected with optical receiver is observed. This process is caused by dusting of protective screen with the thruster parts erosion products. It presents the results of an experiment which goal was to measure the receiver optical transmittance fall speed. The results of calculating the maximum possible measurement time at which the drop in transmittance of the protective screen is not observed. It is shown the calculation of optical emission spectroscopy errors by scanning the thruster plasma through a collimator for each of the test ranges.

Key words: stationary plasma thruster, erosion rate, the optical emission spectroscopy

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