



А. Н. Орехов

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ЭРОЗИИ ИЗОЛЯТОРА РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ СТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Представлены результаты исследований относительной эрозии при различных режимах работы стационарного плазменного двигателя. Определены оптимальные параметры режима работы двигателя, обеспечивающие минимальную эрозию стенок разрядной камеры.

The results of investigations of relative erosion at different modes of the stationary plasma thruster operation are presented herein. The optimal parameters of thruster operation mode ensuring minimum erosion of the discharge chamber walls are defined herein.

33

Ключевые слова: стационарный плазменный двигатель, UV-спектр, эрозия разрядной камеры.

Key words: stationary plasma thruster, UV-spectrum, discharge chamber erosion.

Для изделий космической техники в особенности важны следующие характеристики: гарантируемый срок службы, время безотказной работы, надежность устройства. Различные испытания образцов электроракетных двигателей (ЭРД), проводимые с целью подготовки летных экземпляров, на определенном этапе работ предполагают проведение ресурсных испытаний. Они могут быть организованы как прогнозирование ресурса по предварительным испытаниям, проведение ускоренных испытаний, полная наработка на отказ. Все эти способы связаны с большими материальными и временными затратами при проведении ресурсных испытаний. При работе ЭРД элементы двигателя подвергаются воздействию ускоренной плазменной струи, приводящему к их постепенному разрушению.

Одним из важных элементов, наиболее подверженных эрозии, является разрядная камера (РК) двигателя [1]. Ее разогрев и воздействие плазменной струи приводят к эрозии стенок РК, выработка которой способствует изменению характеристик двигателя.

Существует несколько способов контроля эрозии стенок РК: непосредственный (визуальный, профилометрический и весовой); косвенный (метод оптической эмиссионной спектроскопии (ОЭС) состава плазмы).

Непосредственный метод дает наиболее достоверную информацию о состоянии РК, но требует остановки испытаний, разборку и сборку двигателя, что возможно только при эпизодическом контроле.

Метод ОЭС не требует остановки испытаний и разборки двигателя, что дает возможность организовать постоянный контроль, но он позволяет осуществить только качественный контроль, в лучшем случае полуколичественную информацию об эрозии. Таким образом, оптимальным способом контроля эрозии элементов является сочетание этих двух методов.

Цель работы — проведение испытаний и сравнительного анализа относительной эрозии двигателя типа СПД-140 и определение опти-



мальных параметров его работы при напряжении разряда $U_p = 300$ В и токах разряда $I_p = 15$ А и 10 А, а также подбор оптимальных параметров магнитной системы при расходе рабочего тела в диапазоне от 10 до 15 мг/с. Испытания проводились на стендовой базе ОКБ «Факел» (рис. 1). На стенде установлено кварцевое стекло, которое позволяло исследовать ультрафиолетовую составляющую излучения плазмы.

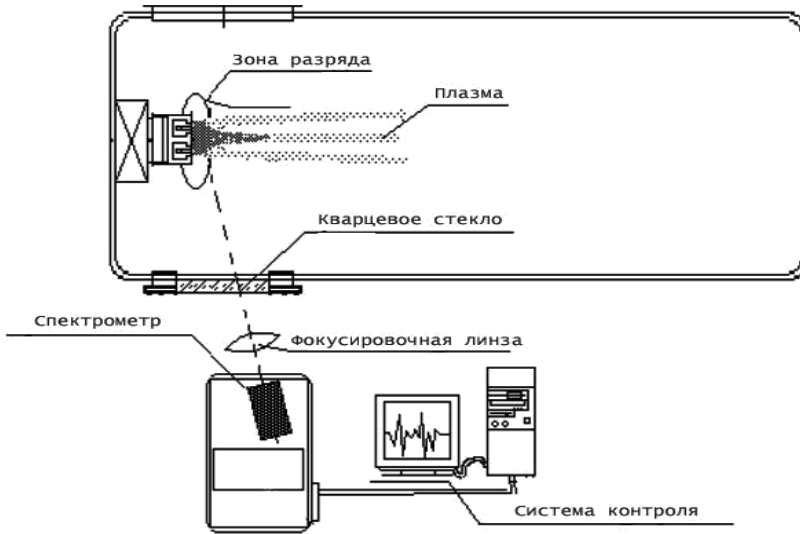


Рис. 1. Схема расположения оборудования при проведении стендовых испытаний двигателя типа СПД-140

Для фиксирования UV-спектра использовался спектрометр высокого разрешения HR4000, представленный на рисунке 2. Оптическое разрешение спектрометра составляет 0,02 нм, диапазон измерений от 200 до 1100 нм в зависимости от типа дифракционной решетки.

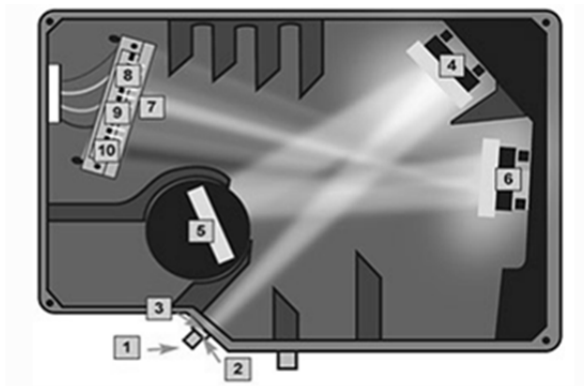


Рис. 2. Устройство спектрометра HR4000:

- 1 – разъем SMA 905; 2 – фиксированная входная щель; 3 – длинноволновый поглощающий фильтр; 4 – коллимирующее зеркало; 5 – дифракционная решетка; 6 – фокусирующее зеркало; 7 – собирающая линза детектора L2 или L4; 8 – детектор; 9 – переменный фильтр высших порядков OFLV; 10 – окно детектора UV2 или UV4



Эффективность метода и его точность зависят от того, насколько точно интенсивность излучения плазмы связана с концентрацией примесных элементов и скоростью эрозии. В общем случае интенсивность описывается радиационно-столкновительной моделью плазмы. Однако разработка точной радиационно-столкновительной модели для разреженной неравновесной плазмы ксенонового двигателя представляет сложную проблему.

При расчетах применялась эмпирическая модель, предполагающая, что интенсивность излучения атомов ксенона и примесей обусловлена их столкновениями с электронами и может быть представлена в следующем виде [2]:

$$I_{ik} = \frac{A_{ik}}{\sum_{r<i} A_{ir}} h\nu_{ik} n_e N_{\text{част}} \langle \sigma_{pi} V_e \rangle = C_{pik} n_e N_{\text{част}} \langle \sigma_{pi} V_e \rangle, \quad (1)$$

где A – вероятность спонтанного излучения; $h\nu$ – энергия фотона; n_e – электронная концентрация; $N_{\text{част}}$ – концентрация частиц сорта p в плазме; $\sigma_{pi}(\varepsilon)$ – сечение возбуждения частиц сорта p на i -й уровень, зависящее от энергии электрона; $\langle \sigma_{pi} V_e \rangle$ усредняется по скоростям электронов V_e ; C_{pik} – константа, зависящая от сорта частиц и уровня возбуждения.

Коэффициент C_{pik} не зависит от режима работы двигателя, поэтому изменения интенсивности излучения какой-либо эмиссионной линии в плазме указывают на изменение произведения концентраций n_e , N_p и функции возбуждения $Q_{pi}(T_e) = \langle \sigma_{pi} V_e \rangle$, которая зависит от электронной температуры. Полагая, что скорость эрозии R прямо пропорциональна концентрации распыленных атомов N_s , можно представить изменение скорости эрозии через отношение интенсивностей примесных линий I_s и линий иона ксенона I_+ :

$$\delta R = \delta N_+ \cdot \frac{\delta I_s}{\delta I_+} \cdot \frac{\delta Q_+(T_e)}{\delta Q_s(T_e)}. \quad (2)$$

Если отношение изменений функций возбуждения $\delta Q_+ / \delta Q_s$ меняется слабо при изменении режимов работы двигателя, то соотношение (2) принимает следующий вид:

$$\delta R \approx \delta N_+ \cdot \frac{\delta I_s}{\delta I_+}. \quad (3)$$

Формулы (2) и (3) являются основой метода оптической спектроскопии для определения скорости эрозии в режиме реального времени. Основная проблема, возникающая при практическом применении этого метода, связана с определением вариации отношения функций возбуждения $\delta Q_+ / \delta Q_s$.



Для определения скорости распыления выбирают те спектральные линии распыленного материала конструкции и ионов рабочего тела, для которых выполняется условие $Q_+ / Q_- \sim const$ (изменяется не существенно), что позволяет для определения скорости эрозии использовать формулу (3). Измерения UV-спектра проводились в области максимальной амплитуды интенсивности спектра. Регистрация параметров работы двигателя типа СПД-140 производилась в реальном времени при помощи автоматизированной стендовой системы измерений. Основными параметрами, регистрируемыми в ходе работы, были ток в катушках намагничивания двигателя (все катушки включены в цепь питания последовательно) и расход рабочего тела. Изменение тока разряда выполнялось без выключения двигателя. После получения спектров при работе двигателя при токах разряда $I_p = 15$ А и 10 А они были сопоставлены с значениями тока в катушках и расхода, полученных на автоматизированной стендовой системе для определения оптимального режима работы двигателя.

Измеренные параметры тока катушек намагничивания и расхода рабочего тела приведены в таблице. Расход в двигателе типа СПД-140 при $I_p = 15$ А был в пределах $14,9 \div 15,0$ мг/с, а при $I_p = 10$ А – $10,8 \div 11,0$ мг/с. Ток в катушках намагничивания при работе на различных режимах составлял $4,4 \div 5,2$ А.

Параметры работы двигателя типа СПД-140

Номер режима	Ток разряда, А	Напряжение разряда, В	Расход РТ, мг/с	Ток катушек намагничивания, А	Относительная эрозия ВI/ХеI
1	15	300	15,0	5,2	0,075
2	10	300	10,8	4,4	0,088
3	10	300	11,0	4,4	0,090
4	10	300	10,8	4,5	0,095
5	15	300	14,9	5,2	0,087

Для расчета относительной эрозии сравнивались интенсивности люминесценции рабочего тела – ксенона (XeI) и бора (ВI). Результаты определения относительной эрозии приведены в таблице и на рисунках 3, 4 при различных значениях тока разряда, тока в катушках намагничивания и расхода рабочего тела.

Из рисунке 4 видим, что эрозия различна при разных режимах работы двигателя типа СПД-140 ($I_p = 10$ А и $I_p = 15$ А). В требуемом диапазоне расхода рабочего тела (от 10 до 15 мг/с) наименьшей эрозии подвергаются стенки разрядной камеры на режиме $I_p = 15$ А. Эрозия разрядной камеры зависит от множества факторов, таких как напряжение разряда, ток разряда, ток в катушках намагничивания, расход [1]. При заданных значениях тока и напряжения разряда для двигателя типа СПД-140 основными факторами, оказывающими наибольшее влияние, выступают расход и ток в катушках намагничивания. Изменяя последний и расход рабочего тела, можно смещать зону ускорения к срезу разрядной камеры, тем самым снижая воздействие плазмы на стенки разрядной камеры [3; 4].

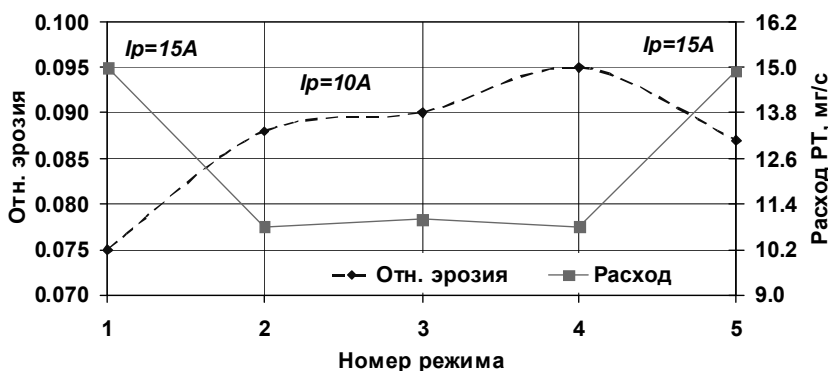


Рис. 3. Зависимость относительной эрозии стенок РК от расхода рабочего тела (ксенона)

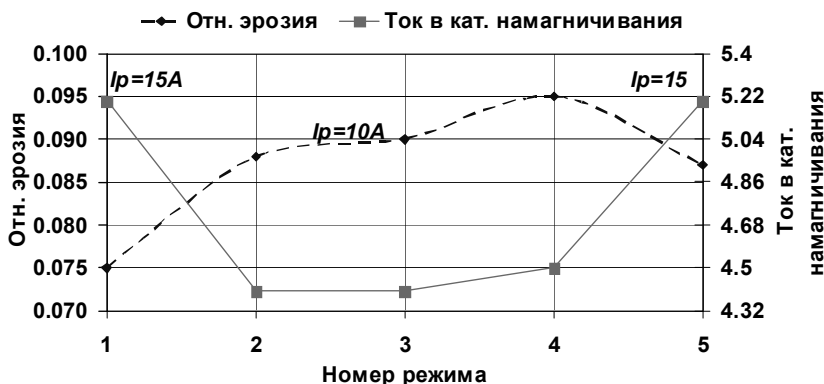


Рис. 4. Зависимость относительной эрозии стенок РК от тока в катушках намагничивания

Проведенная серия испытаний двигателя типа СПД-140 осуществлялась на одном и том же вакуумном стенде при одинаковых условиях испытаний. По результатам определены оптимальные параметры работы двигателя: напряжение разряда – 300 В; ток разряда – 15 А; расход – 15,0 мг/с; ток в катушках намагничивания – 5,2 А. При данных параметрах работы двигателя типа СПД-140 эрозия стенок разрядной камеры минимальна, что обеспечит максимальный ресурс этого двигателя.

Список литературы

1. Khartov S.A., Nadiradze A.B., Shkarban I.I., Zikeeva Y.V. SPT's high lifetime – some problems of solution // IEPC-2005–62, 29th International Electric Propulsion Conference. Princeton, 2005. P. 1–10.
2. Karabadzhak G.F., Semenkin A.V., Tverdokhlebov S.O. Semi-Empirical Method for Evaluation of a Xenon Operating Hall Thruster Erosion Rate Through Analysis of It's Emission Spectra // Spacecraft Propulsion, Third International Conference European Space Agency ESASP-465. 2001. P. 909.



3. *Raitses Y., Staack D., Dorf L., Fisch N.J.* Controlling Ion Acceleration Region in Hall thrusters // IEPC-2005 – 053, 29th International Electric Propulsion Conference. Princeton 2005. P. 1 – 8.

4. *Linnell J.A., Gallimore A.D.* Statistical Analysis of the Acceleration Zone Location in Hall Thrusters // AIAA-2008 – 4721, 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Hartford, 2008.

Об авторах

Александр Николаевич Орехов – асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, инженер-конструктор ФГУП ОКБ «Факел», Калининград.

E-mail: fisikus@mail.ru

About the authors

Aleksandr Orekhov – PhD student, I. Kant Baltic Federal University, design – engineer EDB «Fakel», Kaliningrad.

E-mail: fisikus@mail.ru