

УДК 62-97

Е.Г. АГЕЕВА, А.В. ЛОЯН, В.Ф. ГАЙДУКОВ

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

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭРОЗИИ БЕЗНАКАЛЬНОГО ПОЛОГО КАТОДА МЕТОДОМ ОПТИЧЕСКОЙ ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

*В статье описываются причины ограничивающие ресурс стационарных плазменных двигателей. Рассматривается безнакальный полый катод, как один из наиболее важных элементов движителя. Срок службы катода определяется долговечностью эмиттера. Описываются методы определения скорости испарения активной компоненты эмиттера, проведение зондовых испытаний, спектроскопических. Приведены зависимости полученных результатов относительной эрозии методом оптической спектроскопии плазмы в сравнении с данными полученными методом Ричардсона- Дешмана. Представлены выводы и планы дальнейших испытаний.*

**Ключевые слова:** стационарный плазменный движитель (СПД), безнакальный полый катод (БНК), эмиттер, оптическая спектроскопия плазмы, вольфрамовая матрица, пропитка, коллиматор.

### Введение

Электроракетные двигатели (ЭРД), находят широкое применение как при решении космических задач так и в области технологической обработки материалов. Одними из наиболее перспективных в этой группе двигателей, являются Стационарные плазменные двигатели (СПД). Их использование связано с хорошими энергомассовыми характеристиками и КПД, а также сравнительно высоким удельным импульсом (1500...3000 с) при малой тяге ускорителя (порядка 45 мН).

Основной причиной, ограничивающей ресурс СПД, является ресурс катода-нейтрализатора, как одного из наиболее важных элементов СПД, а также эрозия керамических элементов разрядной камеры двигателя. Ресурс катода, определяется количеством активной компоненты эмиттера, которая понижает работу выхода материала, повышая тем самым его долговечность.

Наиболее надежным методом определения ресурса катода, является испытания его на номинальном режиме работы. Однако такой вариант эксперимента требует не только больших капиталовложений, но и длительного времени работы с изделием. Существуют методы ускоренных испытаний, основанные на измерении количества унесенной массы рабочей компоненты со временем работы изделия. Однако в связи с небольшими массами катода-нейтрализатора и его неразборной конструкцией, такие измерения невозможны. Поэтому актуальной является задача разработки бесконтактного метода определения ресурса катода-нейтрализатора,

без остановки работы изделия, т.е. в реальном времени.

### 1. Метод определения скорости испарения активной компоненты

Эксперимент проводился на безнакальном пологом катоде (БНК М4) с номинальным рабочим током в 4 А, но при максимальном токе в 5,6 А. Особенностью геометрии БНК является наличие эмиттера изготовленного из эмиссионного материала с малой работой выхода (вольфрамовая матрица эмиттера катода пропитана Ва-Sc). Электроны, эмитированные активной поверхностью ионизируют газ (рабочее тело Хе (инертный с низким потенциалом ионизации)) прокачиваемый через корпус катода и формируют катодную плазму. Эмитированные электроны через отверстие в диафрагме поступают в плазму движителя.

Конструкция БНК М4 сделана неразборной, поэтому применить прямой метод измерения эрозии рабочего элемента, подобно методу для СПД [4, 5], невозможно. При определении ресурса БНК было предположено, что зависимость относительной эрозии элементов эмиттера, будет подобна эрозии эмиттера полученной при использовании метода Ричардсона- Дешмана. Для подтверждения этого предположения, был проведен эксперимент с определением температуры на эмиттере катода, который помещался в стеклянную колбу, позволяющую измерять температуру эмиттера пирометром (погрешность составляла 50 0С, согласно паспорту прибора).

Скорость испарения определялась по формуле:

$$\lg W = C - 0,5 \lg T - B/T; \quad (1)$$

где  $W$  – скорость испарения,  $\text{гр}/(\text{см}^2 \cdot \text{сек})$ ;

$T$  – температура эмиттера в  $\text{K}$ ;

$B, C$  – эмпирические коэффициенты для материала эмиттера.

Зависимости скорости испарения активной компоненты эмиттера и температуры, приведены на рис. 1:

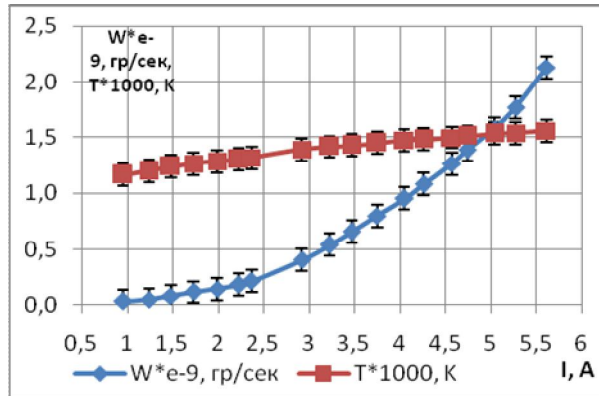


Рис. 1. Изменение скорости испарения компонент эмиттера в зависимости от разрядного тока на катоде и температуры

Как температурные, так и спектроскопические измерения проводились на разных режимах работы катода (0,8- 5,6 А разрядного тока). При этом массовый расход Хе через катод составлял 0,3- 0,4 мг/сек. Значение разрядного тока в каждой экспериментальной точке рис. 1, отличаются на 0,25 А.

В проведенных экспериментах, тепловой континуум, который фиксировался спектрометром в результате нагрева элементов катода, влиял на чистоту полученных данных, поэтому применялся специальный коллиматор.

Для углубленного понимания процессов происходящих в БНК М4, параллельно со спектроскопическими измерениями, необходимо провести и зондовые, которые позволяют определить границы модели описания плазменных процессов в БНК. Зонд Ленгмюра был изготовлен из проволоки ВР, которая помещалась в керамическую трубку, которая затем экранировалась. Рабочая часть зонда составляет – 2 мм. Непосредственно сам зонд, устанавливался на поворотном механизме, позволяющем фиксировать положение зонда через 1 мм. Устройство на основе микрометрического винта позволяет устанавливать зонд в точке, с точностью до 0,05 мм. Комплекс работал следующим образом: на персональном компьютере задавался диапазон измерений по напряжению, величина шунта и формировалась команда на выполнение быстрых и многократных измерений. По окончании измерений, данные обрабатываются специальным программным обеспечением.

Кроме основных команд, измерительный комплекс может выполнять команды калибровки, переключения шунтов, изменения диапазона измерений, количества усреднений.

Согласно теоретическим описаниям по Хаддстоуну, поведение плазмы описывают по несколькими моделями: корональная модель, модель локального термодинамического равновесия и т.д. Для определения модели описания плазмы, применимой в нашем случае, были проведены измерения концентрации  $e^{-1}$ .

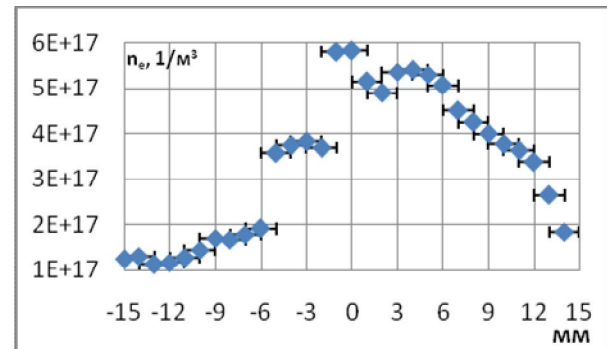


Рис. 2. Концентрация частиц в столбе факела БНК измеренная с помощью зонда

Концентрация частиц при измерении составила  $n_e \approx 6 \cdot 10^{17} \text{ 1/м}^3$ . Расчетное значение концентрации в аналогичных условиях –  $n_e = 8,4 \cdot 10^{21} (\text{м}^{-3})$ .

Условие применимости модели ЛТР (находимся в пределах концентрации частиц от  $1 \cdot 10^{17}$  до  $1 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$ ) для такого количества содержания частиц в плазме выполняется, поэтому мы можем применять эту модель.

## 2. Определение относительной эрозии элементов 4 А катода

Для вычисления относительной эрозии полученной методом оптической эмиссионной спектроскопии (ОЭС) плазмы, были выбраны спектральные линии наиболее выраженных элементов в факеле катода (Барий, Скандий и Ксенон). Спектральные линии, имеющие максимальную интенсивность, выбирались таким образом, что энергия уровня, на каждом новом режиме работы двигателя, должна быть приблизительно одинаковой [8].

Предварительные измерения показывают, что суммарная эрозия катода будет определяться эрозией Ва, Sc. Вольфрам при данных температурах не испаряется. Его спектральные линии не зафиксированы ни в одном из спектров.

Таким образом, эрозия эмиттера будет определяться эрозией Ва и Sc:

$$E_{\text{erosion(cym)}} = E_{\text{erosionBa}} + E_{\text{erosionSc}}, \quad (2)$$

где  $E_{\text{erosion(cym)}}$  – суммарная эрозия эмиттера;

$E_{\text{erosionBa}}$  – значение относительной эрозии по Барию (Ba);

$E_{\text{erosionSc}}$  – значение относительной эрозии по Скандию (Sc).

$$E_{\text{erosionBa, Sc}} = I_{u(er)} (I_{\text{Xe-б}}/I_{\text{Xe-в}}); \quad [2, 4], \quad (3)$$

где  $I_{u(er)}$  – интенсивность линий Бария (Ba) и Скандия (Sc) соответственно

$I_{\text{Xe-б}}$ ,  $I_{\text{Xe-в}}$  – интенсивность линий Xe атомарного и ионизированного соответственно

При этом, определение относительной эрозии измеряется в единицах относительного массового расхода рабочего тела Xe ( $m_{\text{Xe}}$  мг/сек). Тогда кажущийся массоунос (в определении эрозии элементов) для каждого режима определится как:

$$m_{\text{каж}} = E \cdot m_{\text{Xe}}. \quad (4)$$

В предположении, что массоунос с катода определенный по закону Ричардсона- Дешмана, будет равным массоуносу измеренному спектроскопическим методом и определятся выражением:

$$m_{\text{всс}} \cdot t = v \cdot m_{\text{каж}}, \quad (5)$$

где  $m_{\text{всс}}$  – скорость уноса элементов катода, в зависимости от температуры эмиттера катода гр/час;

$t$  – время работы двигателя, час;

$m_{\text{каж}}$  – масса унесенная с элементов двигателя, определенная методом ОЭС, гр.;

$v$  – коэффициент соответствия между методом определения эрозии ОЭС и предполагаемым уносом.

Для вычисления относительной эрозии были выбраны следующие линии: Xe 822,78 нм, Xe 413,01 нм, Ba 388,95 нм, Sc 477,83 нм. Эти линии имеют приблизительно одинаковую энергию уровня.

### 3. Сравнительный анализ спектрального исследования и исследования расчетным методом

Спектральное исследование проводилось с трехразовой повторяемостью, для более высокой достоверности полученных результатов, на двух разных расходах (0,3 мг/сек и 0,4 мг/сек. В итоге, при сравнении относительной эрозии и массоуноса активной компоненты с эмиттера катода полученное расчетом с использованием уравнения Ричардсона-Дешмана и температуры на эмиттере катода (как наиболее нагруженного и наиболее подверженного эрозии элемента), получили в сравнении следующие результаты (рис. 3).

Используя уравнение (5) и результаты экспериментальных исследований (рис. 3), можно вычислить коэффициент соответствия в (рис. 4).

Анализ приведенных результатов показывает, что характер кривых совпадает, с точностью до погрешности эксперимента.

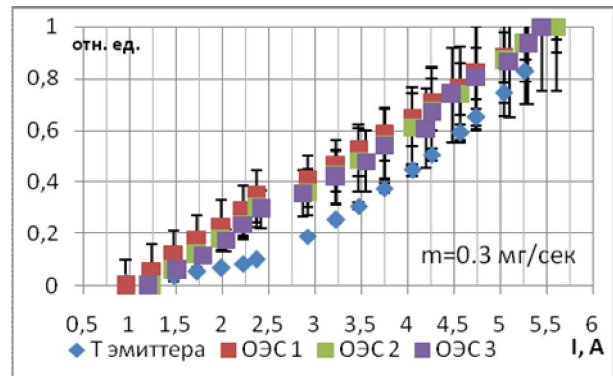


Рис. 3. Относительная эрозия по времени (для трех повторяющихся экспериментов)

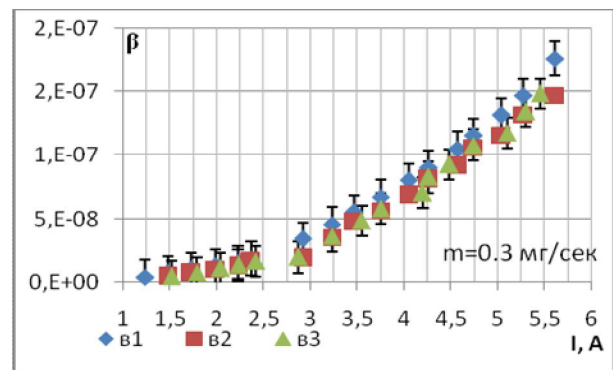


Рис.4. Коэффициент соответствия между предполагаемым массоуносом по Ричардсону-Дешману с БНК и суммарным массоуносом по методу ОЭС

Из данных полученных спектроскопическим методом, и зависимостью для определения массоуноса с элементов БНК, получим формулу, для определения скорости массоуноса в гр/час:

$$M = v \cdot m_{\text{каж}}. \quad (6)$$

Сравнение приведенных результатов позволяет считать, что дальнейшие вычисления можно проводить используя значение коэффициента в (рис. 4), для заданного значения разрядного тока, по выражению (6).

Основываясь на предыдущем рассуждении, провели такой же эксперимент, при расходе РТ через тракт катода равного 0,4 гр/сек. Получили следующие результаты:

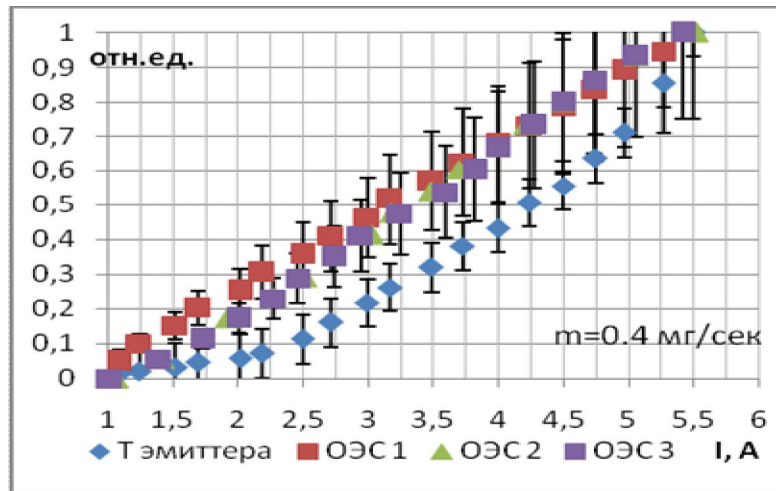


Рис. 5. Относительная эрозия по времени

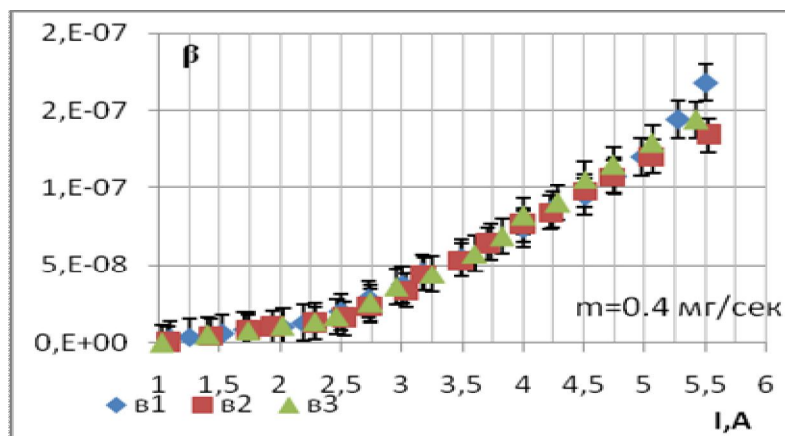


Рис. 6. Коэффициент соответствия между предполагаемым массоуносом по Ричардсону- Дешману с БНК и суммарным массоуносом по методу ОЭС

## Выводы

Согласно полученным данным, можем отметить, что эрозия эмиттера, как наиболее подверженного этому процессу элемента, больше при большем расходе рабочего тела через катод (используя данные о прогнозированном ресурсе). Можно предположить, что это связано с тем, что частицы РТ Хе, выбивают атомы активной компоненты из эмиттера быстрее при их (атомах Хе) большем содержании в плазме.

В дальнейшем планируются более длительные испытания, с целью анализа работы катода от выработанного ресурса.

## Литература

1. Зайдель, А.Н. Таблицы спектральных линий [Текст] / А.Н. Зайдель, В.К. Прокофьев. – М.: Наука, 1977. – 342 с.
2. Спектроскопические исследования струи холловского двигателя с целью определения скорости эрозии ускорительного канала в ходе длитель-

ных ресурсных испытаний. [Текст] / В. Блинов, Ю.М. Головин, О.А. Горшков, Е.Н. Дышлюк, А.А. Шагайда // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 9 (25). – С. 38 – 42.

3. Pagnon, D. SPT20 Hall effect thruster first Optical Emission Spectroscopy measurements on the KhAI ground test facility [Text] / D.Pagnon, T.A. Maksimenko, A.V. Loya // *10<sup>th</sup> International Congress of Propulsions Engineering, Rubechje, Crimea, Ukraine (2005)*.

4. Pagnon, D. On-board Optical Emission Spectroscopy Experiment. [Internet resource] / D. Pagnon // *2<sup>nd</sup> France-Ukraine Workshop, Kharkov, Ukraine 2005*. – P. 45 – 52.

5. Исаев, Е.А. Исследование эрозии полых катодов методом оптической спектроскопии. [Текст] / Е.А. Исаев, А.И. Оранский, А.А. Титов // *Ракетно-космическая техника. НТС. Ракетные двигатели и энергетические установки*. – М.: НИИТП, 1991. – Вып. 3 (131). – С. 170 – 173.

6. Лоян, А.В. Экспериментальні дослідження ресурсних характеристик МСПД [Текст] / А.В. Лоян, Т.О. Максименко, В. О. Подгорний // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2008. – № 7 (540). – С. 144 – 148.

7. Диагностика плазмы [Текст] / под ред. Р. Хаддлстоун, С. Леонард. – М.: Мир, 1967. – 250 с.  
8. Кошелев, Н.Н. Исследование полого катода для микро СПД [Текст] / Н.Н. Кошелев, А.В. Лоян // Авиационно-космическая техника и технология. – 2003. – №5(40). – С. 164 – 168.

Поступила в редакцию 25.06.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, профессор кафедры двигателей и энергоустановок летательных аппаратов А.И. Оранский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского, «ХАИ», Харьков, Украина.

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕРОЗІЇ БЕЗНАЧАЛЬНОГО ПОРОЖНИСТОГО КАТОДА МЕТОДОМ ОПТИЧНОЇ ЕМІСІЙНОЇ СПЕКТРОСКОПІЇ

*К.Г. Агеева, А.В. Лоян, В.Ф. Гайдуков*

В статті описуються причини, що обмежують ресурс стаціонарних плазмових двигунів. Розглядається безнакальний порожнистий катод, як один з найбільш важливих елементів рушій. Термін служби катода визначається довговічністю емітера. Описуються методи визначення швидкості випаровування активної компоненти емітера, проведення зондових випробувань, спектрометричних. Приведені залежності отриманих результатів відносної ерозії методом оптичної спектроскопії плазми порівняно з даними отриманими методом Річардсона-Дешмана. Представлені висновки і плани подальших випробувань.

**Ключові слова:** стаціонарний плазмовий рушій (СПД), безнакальний порожнистий катод (БНК), емітер, оптична спектроскопія плазми, вольфрамова матриця, просочення, коліматор.

### EXPERIMENTALLY RESEARCH OF SELFHEATED HOLLOW CATHODE EROSION BY OPTICAL SPECTROSCOPY METHOD

*K. G. Ageeva, A. V. Loyan, V. F. Gaydukov*

In article the reasons limiting a resource of stationary plasma engines are described. The selfheated hollow cathode, as one of the most important elements of a thruster is considered. Service life of the cathode is defined by durability of the emitter. Methods of determination of speed of evaporation active emitter components, carrying out zondovy tests, spectroscopic are described. Dependences of the received results of a relative erosion by a method of optical spectroscopy of plasma in comparison with data received by Richardson's - Deshman method are given. Conclusions and plans of further tests are presented.

**Key words:** stationary plasma thruster (SPT), selfheated hollow cathode (SHC), emitter, optical spectroscopy of plasma, tungsten matrix, impregnation, collimator.

**Агеева Екатерина Геннадьевна** – студентка кафедри двигателей и энергоустановок летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: Kate\_ageeva@ukr.net.

**Лоян Андрей Витальевич** – канд. техн. наук, старший научный сотрудник кафедры двигателей и энергоустановок летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: a.loyan@khai.edu.

**Гайдуков Виталий Федорович** – канд. техн. наук, доцент кафедры двигателей и энергоустановок летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.