

УДК 533.9.07

А. Н. ХАУСТОВА

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СПД-70 НА ОТНОСИТЕЛЬНУЮ ЭРОЗИЮ ВНУТРЕННЕЙ И НАРУЖНОЙ КЕРАМИЧЕСКИХ ВСТАВОК ПО ОТДЕЛЬНОСТИ**

В статье показано, что при помощи метода ОЭССК есть возможность отслеживать скорости эрозии стенок ГРК СПД по отдельности, непосредственно во время поведения эксперимента. Представлены результаты проведения исследований скорости относительной эрозии методом ОЭС и методом ОЭССК при различных токах катушек СПД. Согласно анализу экспериментальных данных показано, что тенденция поведения измеряемых зависимостей подобны для обоих методов исследований. Сделаны выводы о том, что при исследованиях метод ОЭССК является инструментом для определения режима работы двигателя с минимальным износом материала ГРК.

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

Введение

Стендовые испытания стационарных плазменных двигателей (СПД) один из важнейших этапов наземной отработки управляющей системы ДУ. В их номенклатуру входят исследовательские, доводочные, ресурсные, установочные и контрольно-проверочные испытания [1]. Особенную позицию, с точки зрения проектирования СПД, занимают исследовательские испытания, которые проводятся с целью изучения влияния управляющих факторов (мощность питания, подводимая к двигателю; токи катушек, задающих параметры магнитного поля и массовый расход) на выходные интегральные характеристики: тягу, удельный импульс, коэффициент полезного действия (КПД) и ресурс. Чем обширнее и точнее получаемая информация о процессах данного взаимодействия в двигателе, тем проще и быстрее будет разрабатываться новая конструкция, и совершенствоваться уже существующая модель. А уменьшение сроков изготовления двигателя и сокращение временной базы испытаний, в особенности ресурсных, приводит к существенному снижению временных и материальных затрат.

Из сказанного выше очевидно, что одним из направлений работ проводимых в научно-исследовательских лабораториях является развитие и совершенствование диагностической базы. В данном направлении проводятся работы в лаборатории ЭРД ХАИ. На основании метода оптической эмиссионной спектроскопии (ОЭС) был разработан метод оптической эмиссионной спектроскопии со сканированием плазмы через коллиматор (ОЭССК) для дифференциального исследования относитель-

ной скорости эрозии наружного и внутреннего изоляторов газоразрядной камеры (ГРК) стационарного плазменного двигателя (СПД) [2]. Необходимость данной разработки состоит в том, что существующие методы диагностики (массовые и профилометрические) или не позволяют получать информацию во время проведения ресурсных испытаний или при измерениях получают данные о скорости эрозии непосредственно со всей поверхности ГРК (метод ОЭС). Метод ОЭССК позволяет исследовать влияние управляющих факторов на скорость эрозии изоляторов ГРК по отдельности. В случае если одна керамика изнашивается быстрее другой, это приведет к сокращению ресурса двигателя в целом.

В [3] показано, что скорость износа изоляторов является функцией от магнитного поля двигателя. При исследовании режимов работы двигателя токи катушек подбираются, таким образом, чтобы преобладала скорость эрозии то с внутренней, то с наружной керамических стенок РК. Описанная зависимость была рассмотрена в этой статье. Для этого были проведены исследования совместно методом ОЭС и ОЭССК. Цель исследований: определение влияния магнитного поля на относительную скорость эрозии внутреннего и наружного изоляторов РК. Поданы результаты сравнения данных полученных обоими методами.

1. Измерения методом ОЭС

Схема эксперимента методом ОЭС представлена на рис.1. Оптический кабель устанавливался в стационарном положении. Регистрация спектра проводилось со всего объема излучения плазмы

двигателя мощностью 650 Вт при режиме: разрядное напряжение 150 В, массовый расход 1,25 мг/с, разрядный ток 1,2...2,7 А. Измерения проводились в два этапа. На первом этапе ток наружной катушки устанавливался равный максимальному и изменялся ток внутренней катушки. На втором - изменялся ток наружной катушки, без изменения тока внутренней.



Рис. 1. Расположение оптического кабеля при измерениях методом ОЭС

На рисунке 2 показаны результаты расчетов относительной скорости эрозии. Как видно по рисунку 2 а, с уменьшением тока внутренней катушки объемная скорость эрозии увеличивается. Подобная картина наблюдается и на рисунке 2 б, однако в диапазоне изменения тока наружной катушки от 30 до 100 % скорость эрозии практически неизменна.

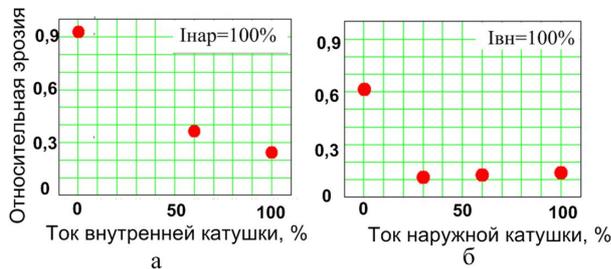


Рис. 2. Зависимость относительной эрозии от величины токов катушек (ОЭС)

Полученные результаты позволяют выделить режим работы двигателя с наименьшим износом. Однако, невозможно сделать выводы о том, как МП влияет отдельно на каждую из керамических вставок ГРК. А это необходимо для того, чтобы понимать насколько быстрее или медленней одна керамическая вставка изнашивается относительно другой и в дальнейшем использовать эти результаты при проектировании формы и размеров ГРК.

2. Измерения методом ОЭССК

При измерениях методом ОЭССК двигатель работал в номинальном режиме: разрядное напряжение 300 В, массовый расход 1,6 мг/с, разрядный ток 1,8...2,8 А. ОП устанавливался в положении

измерений с наружной керамической вставкой (НКВ) ГРК (рис.3 а), а затем с внутренней керамической вставкой (ВКВ) ГРК (рис.3б). Проведение измерений осуществлялось по аналогичной методике, что и при первом эксперименте. А именно: на первом этапе ток наружной катушки устанавливался равный максимальному, и изменялся ток внутренней катушки. На втором - изменялся ток наружной катушки, без изменения тока внутренней. Далее производились расчеты относительной скорости эрозии отдельно для НКВ и ВКВ. При сопоставлении результатов измерений обеих керамических вставок учитывалось следующее:

1. Изоляторы ГРК расположены на различном расстоянии от ОП, рис. 3.
2. Объем излучающей в ОП плазмы был различен для НКВ и ВКВ для каждой из измеряемых точек.

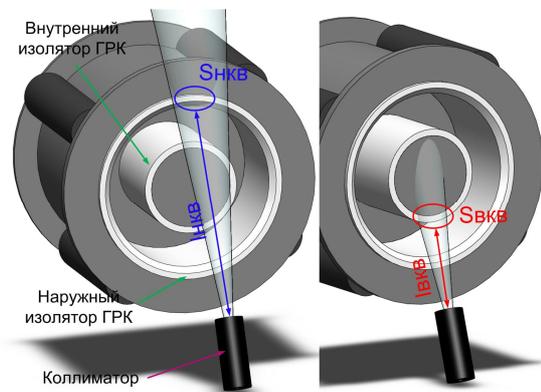


Рис. 3. Расположение оптического приемника при измерениях методом ОЭССК:

Результаты расчетов представлены на рисунках 4 - 6. Тенденция поведения зависимостей полученных методом ОЭССК подобна результатам расчетов полученных методом ОЭС, как на первом этапе измерений, так и на втором.

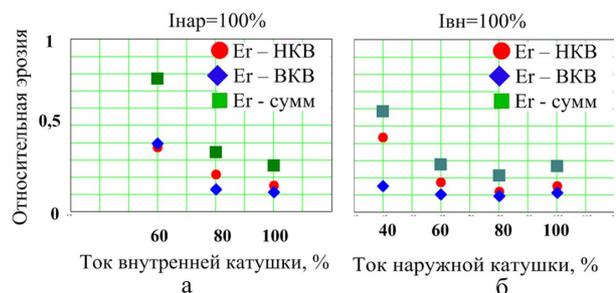


Рис. 4. Зависимость относительной эрозии от величины токов катушек (ОЭССК): Er-НКВ – относительная эрозия наружной керамической вставки ГРК; Er-ВКВ – относительная эрозия внутренней керамической вставки ГРК; Er-сумм – суммарная относительная эрозия обеих керамической вставок ГРК

На рисунке 5 показаны зависимости относительной эрозии от токов катушек для каждого из изоляторов по отдельности. Было отмечено, что при токе наружной катушки $I_{НАР}$ равном 1,5 А массоунос материала с ВКВ выше, чем для НКВ (рис. 5а). Далее с увеличением $I_{НАР}$ до 2 А E_r обеих керамических вставок выравниваются. И как показано на рисунке 6 при $I_{НАР}$ выше 2,5 А износ материала с НКВ преобладает над ВКВ. Полученные результаты подтверждают гипотезу о том, что варьируя токи катушек СПД можно определить режим, при котором потеря материала с обоих изоляторов ГРК одинакова.

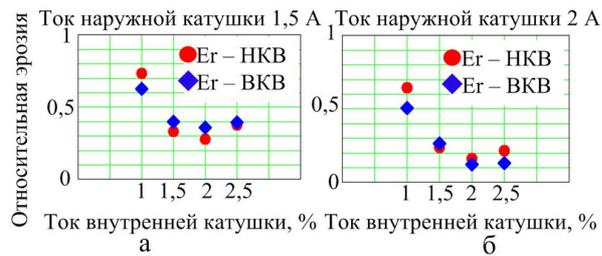


Рис. 5. Относительная эрозия НКВ и ВКВ ГРК в зависимости от токов катушек (ОЭССК): $I_{НАР}$ – 1,5 А и 2,0 А; $I_{ВН}$ – 1 ... 2,5 А

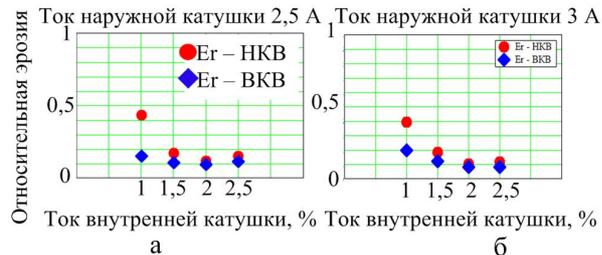


Рис. 6. Относительная эрозия НКВ и ВКВ ГРК от токов катушек (ОЭССК): $I_{НАР}$ – 2,5 и 3,0 А; $I_{ВН}$ – 1 ... 2,5 А

Далее были выбраны три режима работы двигателя с минимальной скоростью эрозии с обеих керамических вставок, табл. 1.

Таблица 1

Режимы работы СПД

№	$I_{НАР}$, А	$I_{ВН}$, А	U_d , А	I_d , А	I_i , А	КПД, %
1	3	2	300	1,94	0,35	38
2	2,5	2		1,86	0,420	46
3	2	2		1,82	0,393	43

Анализируя таблицу 1, из условий минимального разрядного тока I_d и максимального КПД выбран режим №2, который в дальнейшем будет рекомендован для этого двигателя: U_d – 300 В, I_d – 1,86 А, $I_{НАР}$ – 2,5 А, $I_{ВН}$ – 2 А.

Заключение

В данной статье представлены результаты исследований влияния магнитного поля СПД-70 мощностью 650 Вт на относительную эрозию внутренней и наружной керамических вставок РК. Получено, что относительная скорость эрозии изоляторов в значительной мере зависит от параметров магнитного поля.

Проведено сравнение результатов полученных методами ОЭС и ОЭССК. Показано, что тенденция поведения зависимостей при измерениях методом ОЭССК подобна результатам измерений методом ОЭС.

По результатам измерений методом ОЭССК получены скорости эрозии отдельно наружного и внутреннего изоляторов РК. Показано, что в зависимости от соотношения токов катушек преобладает скорость эрозии то с внутренней, то с наружной керамических стенок РК.

Анализ данных позволил определить режим работы двигателя с минимальной скоростью эрозии с обеих керамических вставок, минимальным разрядным током и максимальным КПД.

Литература

1. Горшков, О. А. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов [Текст] / О. А. Горшков, В. А. Муравлев, А. А. Шагайда ; под ред. А. С. Коротеева. – М. : Машиностроение, 2008. – 279 с.
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 : 05.07.05М / Приданников Сергей Юрьевич. – Калининград, 2013. – 203 с.

References

1. Gorshkov, O. A., Muravlev, V. A., Shagajda, A. A. *Hollovskie i ionnye plazmennye dvigateli dlja kosmicheskikh apparatov* [Hall and Ion plasma thruster for space crafts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008. 279 p.
2. Khaustova, A. N., Loyan, A. V., Ribalov, O. P. *Razrabotka opticheskogo pryemnyka dlya yzmerenyya skorosty erozyu ot del'no naruzhnoy y vnutrenney keramicheskyykh vstavok hazorazryadnoy kamery statsyonarnoho plazmennoho dvyhatelya* [Development

of optical receiver for erosion rate measurements of gaseous discharge chamber external and internal ceramics separately]. *Vestnyk dvigatelestroeniya*, 2015, no. 2, pp. 29-36.

3. Pridannikov, S. Yu. *Issledovanie kharakteristik statsionarnykh 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.

Поступила в редакцию 12.05.2016, рассмотрена на редколлегии 16.06.2016.

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.

Благодарность

Автор выражает искреннюю благодарность за полезные дискуссии при подготовке статьи:

- **Лояну Андрею Витальевичу** – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. каф. 402, начальник отдела ЭРДУ МНТЦ КЭД Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»;
- **Титову Максиму Юриевичу** – аспирант кафедры двигателя и энергетические установки летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ».

ВПЛИВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ СПД-70 НА ВІДНОСНУ ЕРОЗІЮ ОКРЕМО ВНУТРІШНЬОЇ ТА ЗОВНІШНЬОЇ КЕРАМІЧНИХ ВСТАВОК

О. М. Хаустова

У статті показано, що за допомогою методу ОЕССК є можливість відслідковувати швидкості ерозії стінок ГРК СПД окремо, безпосередньо під час проведення експерименту. Надано результати досліджень швидкості відносної ерозії методом ОЕС і методом ОЕССК при різних токах котушок СПД. Згідно з аналізом експериментальних даних показано, що тенденція поведінки вимірюваних залежностей подібні для обох методів досліджень. Зроблено висновки про те, що при дослідженні метод ОЕССК є інструментом для визначення режиму роботи двигуна з мінімальним зносом матеріалу ГРК.

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

INFLUENCE OF SPT-70 MAGNETIC FIELD ON OUTER AND INNER CERAMIC RELATIVE EROSION RATE INDIVIDUALLY

A. N. Khaustova

In the article it is shown that OESSK method allows tracking of outer and inner ceramic relative erosion rate of the discharge chamber walls individually, directly during the time of experiment. Results of the erosion rate research with different SPT coil currents by mean of OES and OESSK method are presented. Experimental data analysis showed that tendency of measured dependences behavior is similar for both research methods. In the conclusion it is shown that OESSK method is a tool for the determination of thruster operating modes with minimal wear of discharge chamber material.

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