

УДК 621.455.034

А. Н. ХАУСТОВА, А. В. ЛОЯН, О. П. РЫБАЛОВ, Е. И. ИЩЕНКО

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

## ПРОФИЛОМЕТРИРОВАНИЕ КРОМОК РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ СТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В работе показано, что одним из факторов, влияющих на продолжительность работы стационарного плазменного двигателя, является ресурс керамической разрядной камеры, который в свою очередь зависит от скорости эрозии кромок изоляторов. Для получения количественных данных про степень развития эрозионных процессов проводятся ресурсные испытания двигателя, с поэтапным контролем изменения формы кромок разрядной камеры. В работе предложено несколько способов профилометрирования изоляторов двигателя. Рассмотрены преимущества и недостатки каждого из методов, определены факторы, влияющие на погрешность измерений.

**Ключевые слова:** стационарный плазменный двигатель, разрядная камера, керамика, ресурс, эрозия

### Введение

Эффективность применения стационарных плазменных двигателей (СПД) доказана многолетним опытом их эксплуатации на борту различных космических летательных аппаратов (КЛА). Двигательные установки (ДУ) на основе СПД обладают высокой эффективностью и надежностью [1]. КПД двигателей составляет порядка 60 %. Модельный ряд по мощности варьируется от 1 до 100 кВт. Прогноз показывает, что улучшение параметров СПД в дальнейшем позволит полностью заменить традиционные типы двигателей на борту КЛА [2].

Сегодня одним из основных препятствий для расширения круга задач, выполняемых СПД, является ресурс [2]. Повышение ресурса двигателя позволит в значительной степени увеличить период активного существования ДУ и вследствие этого самого КЛА, а также позволит снизить необходимое количество запусков спутников.

Определяющим фактором, влияющим на срок эксплуатации двигателя, является эрозия кромок изолятора разрядной камеры (РК). Износ керамики возникает вследствие ее разрушения ионным потоком высокой энергии.

Существует два пути исследований скорости эрозии кромок РК: теоретический и экспериментальный. Недостаточная изученность процессов распыления изоляторов РК не позволяет с необходимой точностью теоретически определить скорость развития эрозионных процессов кромок керамики во времени, что приводит к необходимости проведения натурных испытаний двигателя с последующим измерением величины износа изоляторов.

В работе представлено несколько способов профилометрирования кромок РК СПД.

### 1. Измерение толщины торцов кромок изоляторов СПД

Известно, что при работе двигателя основными элементами, которые в наибольшей степени подвергаются эрозии, являются кромки изоляторов РК, рис. 1. Измерение формы профиля эрозии кромки РК можно проводить несколькими способами: путем измерения толщины торца изолятора, а также бесконтактное и контактное профилометрирование.



Рис. 1. СПД, изнашиваемые поверхности РК

В [3] предложена следующая методика измерений степени износа кромок РК. Перед началом испытаний производится измерений толщины тор-

цов обоих изоляторов  $s_0$  инструментальным микроскопом (типа БМИ-1Ц), как показано на рис. 1.

После испытаний повторяются измерения толщины  $s_n$  и определяется параметр  $eR$ , по (1), который получил название: радиальная скорость эрозии, мм/ч.

$$eR = \frac{s_0 - s_n}{t}, \quad (1)$$

где  $n$  – номер этапа испытаний, т.е. номер измерения.

В [3] в качестве базы для измерения толщины предложено использовать наружный диаметр наружного изолятора и внутренний диаметр внутреннего изолятора (база А, рис. 2), так как они не подвержены воздействию ионного потока. Однако в процессе отработки методики выяснилось, что на эти поверхности осаждаются продукты износа двигателя, что вносит погрешность в результаты измерений. В качестве базы для измерения толщины наружного изолятора предложено использовать наружный диаметр магнитопровода (база Б, рис. 2), а для внутреннего изолятора предложено в магнитопроводе выполнять технологическую канавку, от которой производятся измерения.

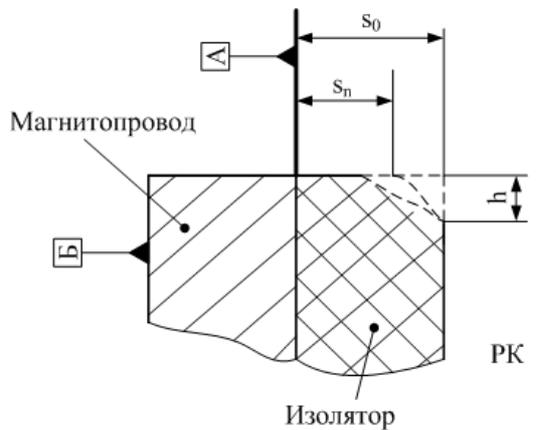


Рис. 2 Схема измерений толщины торца изолятора СПД

Погрешность предложенного способа измерений зависит от двух факторов:

- погрешности измерительной системы (микроскопа);
- степени эрозии за один этап испытаний.

Для измерений радиальной эрозии РК использовались микроскопы типа БМИ-1Ц или УИМ-21 с погрешностью менее микрона на длине до 20 мм.

Необходимое время наработки двигателя определено исходя из следующих соображений. Для двигателя мощности 1,35 кВт скорость эрозии со-

ставляет порядка двух микрон в час. Следовательно, для того чтобы при измерениях погрешность составила порядка 2 % временная база наработки СПД должна составить не менее 50 часов.

Преимущество предложенной методики заключается в нескольких положениях:

- бесконтактность – отсутствует касание измерительного инструмента со стенками РК, следовательно, исключено образование царапин или сколов керамики при измерениях;
- высокая точность измерений;
- исключена необходимость разработки разборной конструкции СПД со съемными стенками РК.

Недостатком данного метода является то, что отсутствует возможность контроля глубины износа кромок  $h$ , рис. 2.

## 2. Методика бесконтактного профилометрирования кромок изоляторов СПД

Бесконтактный способ годен для разборных конструкций СПД со съемными керамическими изоляторами РК. Схема метода измерений представлена на рисунке 3. Керамический изолятор устанавливается на предметный стол микроскопа, например, металлографического (типа ММУ-1600 Н). Для регистрации вертикального перемещения стола используется индикаторная головка (типа МИГ-1) с ценой деления 1 мкм и погрешностью не более 0,5 мкм.

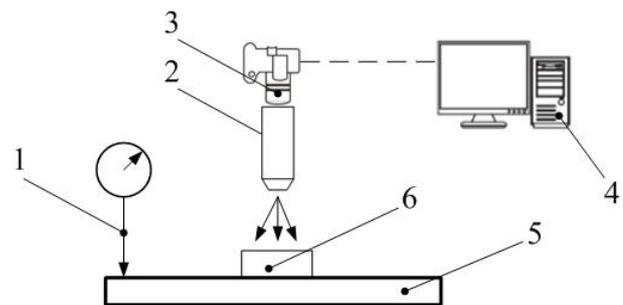


Рис. 3. Схема измерений бесконтактным способом: 1 – индикаторная головка; 2 – объектив микроскопа; 3 – камера; 4 – компьютер; 5 – предметный стол микроскопа; 6 – керамическая вставка

Принцип измерений заключается в следующем. Фокус объектива наводится на верхнюю плоскость керамической вставки, см. рис. 4 положение 1 и записываются показания индикаторной головки. При помощи камеры микроскопа выполняется снимок области обзора объектива, и изображение выводится на компьютер для дальнейшей обработки.

После этого фокус переводится на вторую регистрируемую точку, см. рис. 4 положение 2 и процедура повторяется. Расстояние  $\Delta$  между точками 1 и 2 восстанавливается по фотографиям.

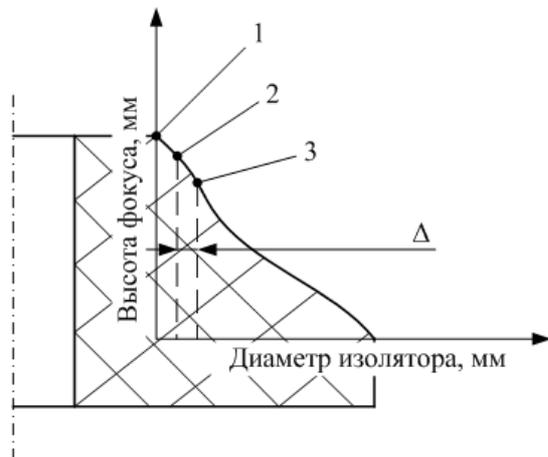


Рис. 4. Принципиальная схема измерений бесконтактным способом

Предложенный способ профилометрирования обладает рядом преимуществ:

- бесконтактность – отсутствие касания измерительных инструментов с поверхностью изоляторов;

- простота проведения измерений – программное обеспечение современных микроскопов позволяют проводить калибровку оптической и измерительной части, что заметно упрощает методику измерений;

- краткосрочность проведения измерений.

Погрешность способа зависит от трех факторов: глубины фокусировки объектива микроскопа, точности калибровки и погрешности индикаторной головки.

### 3. Методика контактного профилометрирования кромок изоляторов СПД

Для того чтобы поэтапно контролировать выработку не только толщины кромки изолятора, но и ее профиль была разработана следующая методика, рис. 5.

СПД устанавливается на неподвижной опоре координатного механизма 1. На предметный стол 6 неподвижно устанавливается стойка с индикаторной головкой 5. Индикатор оборудован щупом особой формы для обеспечения измерений в глубине РК 2 и исключения возможности нанесения повреждений изоляторам 3, 4.

Измерения профиля пояска эрозии РК проводятся следующим способом. Щуп выставляется на поверхности изолятора, и вводится на глубину пре-

вышающую ширину пояска эрозии. Далее индикаторная стойка вместе с предметным столом координатного механизма перемещается в направлении от двигателя и при этом регистрируются показания на индикаторе. В результате измерений получают зависимость показаний индикатора от координаты его положения относительно начальной точки установки щупа.

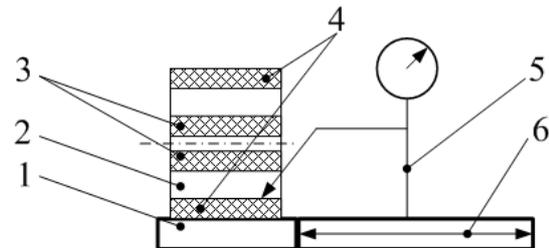


Рис. 5. Методика контактного профилометрирования кромок изоляторов СПД: 1 – неподвижная опора координатного механизма; 2 – РК СПД; 3 – внутренний керамический изолятор; 4 – наружный керамический изолятор; 5 – индикаторная головка; 6 – подвижная опора координатного механизма

После проведения измерений требуется ввести поправку в полученные данные исходя из следующих соображений. Рассматривая схему, рис. 6, очевидно, что в положении индикатора I, когда он находится на горизонтальной плоскости, реакция опоры  $F$  на щуп действует перпендикулярно плоскости опоры и проходит через центр щупа. В случае I индикатор регистрирует истинное положение высоты установки опоры. В случае II точка соприкосновения щупа с опорой смещается относительно центра щупа. Направление реакции  $F$  образует угол  $\alpha$  с поверхностью опоры.

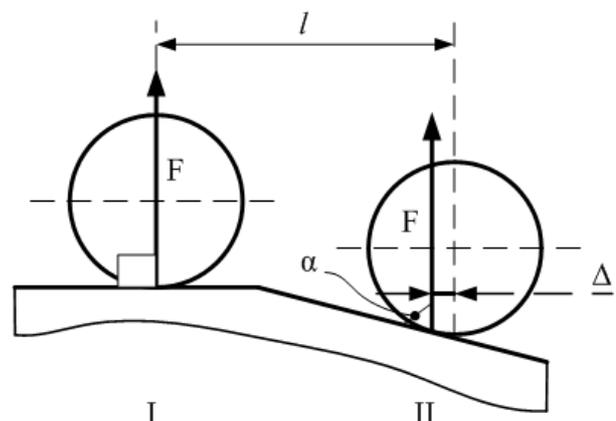


Рис. 6. Схема измерений профиля кромки РК индикаторной головкой

В итоге получается, что при перемещении индикатор смещается на длину  $l$ , однако, показания считаются с длины  $l-\Delta$ , что необходимо учитывать в проведенных измерениях.

Поправка  $\Delta$  была найдена из следующей расчетной схемы, рис. 7. Из соотношений двух треугольников было составлено уравнение (2):

$$\Delta^4 + 2a\Delta^3 - \Delta^2(a+b) + b^2 r^2 = 0, \quad (2)$$

где  $a$  – перемещение индикатора, мм;  
 $b$  – показание индикатора, мм;  
 $r$  – радиус щупа индикатора, мм.

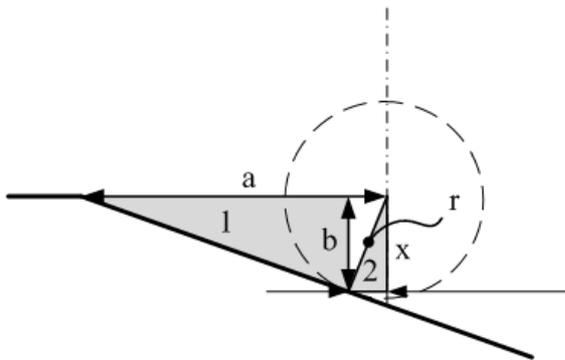


Рис. 7. Расчетная схема определения поправки при профилометрии кромки РК

На рисунке 8 представлены результаты профилометрии кромок двух двигателей СПД-100в2 [4] и СПД-100 [5]. Данные получены по результатам испытаний на временной базе в 300 часов. Режим работы двигателя: напряжение разряда 300 В, анодный массовый расход 4 мг/с.

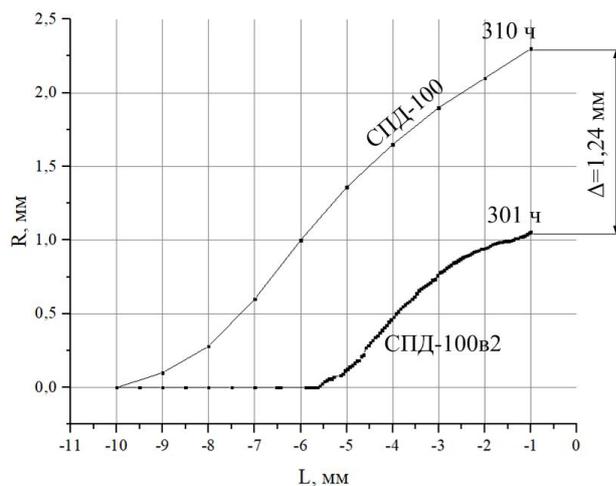


Рис. 8. Результаты профилометрии кромок РК двигателя мощности 1,35 кВт

По результатам получено, что на временной базе работы обоих двигателей в 300 часов, разница износа кромки двигателей составила 1,24 мм. Ресурс СПД-100 составляет 4 000 часов. Согласно данным по износу изоляторов РК СПД-100в2, ресурс этого типа двигателя составит 8 000 часов.

Преимущество контактного способа профилометрии заключается в том, что его можно применять для различных конструкций СПД независимо от размеров двигателя.

Недостаток метода заключается в том, что в процессе профилометрии происходит контакт измерительного щупа с керамической стенкой РК, что вводит дополнительную погрешность в измерения.

## Заключение

Один из основных факторов, который влияет на продолжительность работы СПД – ресурс кромок стенок РК. Для изучения износа керамики проводятся испытания двигателя с последующим контролем изменения профиля изоляторов. В работе рассмотрено несколько способов измерения степени износа изоляторов.

Проведен анализ методики измерения толщины торцов изоляторов РК с последующим определением радиальной эрозии. Показано, что данный способ является наиболее приемлемым для неразборных конструкций СПД в силу высокой точности измерений.

Предложен способ бесконтактного профилометрии кромок изоляторов РК СПД при помощи измерений металлографическим микроскопом типа ММУ-1600Н. Показаны преимущества и недостатки методики.

Предложен способ контактного профилометрии кромок изоляторов РК СПД. Показаны преимущества и недостатки методики. Приведены результаты измерений профиля двигателя СПД мощностью 1,35 кВт.

Проведено сравнение профилей износа изоляторов двух различных конструкций СПД.

## Литература

1. 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.
2. Горшков, О. А. Холловские ионные двигатели для космических аппаратов [Текст] / О. А. Горшков, В. А. Муравлев, А. А. Шагайда. – М.: Машиностроение, 2008. – 279 с.

3. Приданников, С. Ю. Исследование характеристик стационарных плазменных двигателей при длительной работе [Текст] / дис. ... канд. техн. наук : 05.07.05 / Приданников Сергей Юрьевич. – Калининград, 2003. – 203 с.

4. Лоян, А. В. Анализ конструкции стационарного плазменного двигателя на стартовые нагрузки [Текст] / А. В. Лоян, А. И. Цаглов, А. И. Писаный // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2016. – № 7(134). – С. 117–120.

5. Меркурьев, Д. В. Способы повышения тяговых характеристик стационарного плазменного двигателя на режимах работы с высоким удельным импульсом тяги [Текст] / дис. ... канд. техн. наук : 05.07.05 / Меркурьев Денис Владимирович. – Москва, 2015. – 138 с.

## References

1. Khaustova, A. N., Loyan, 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.

2. Horshkov, O. A., Muravlev V. A., Shahayda, A. A. *Khollovskye yonnye dvigately dlya kosmycheskykh apparatov* [Hall ion thrusters for the spacecrafts]. Moscow, Mashynostroenye Publ., 2008. 279 p.

3. Prydannikov, S. Yu. *Yssledovaniye kharakterystyk statsyonarnykh plazmennykh dyvigateley pry dlytel'noy rabote*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Investigation of stationary plasma characteristics during long time operation. PhD diss.]. Kalynynhrad, 2003. 203 p.

4. Loyan, A. V., Tsaglov, A. I., Pisanyi, A. I. Analiz konstruksii stacionarnogo plazmennogo dvigatelya na startovye nagruzki [Modeling of stationary plasma thruster type SPT 100construction on launch loads]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia - Aerospace technic and technology*, 2016, no. 7(134), pp. 117–120.

5. Merkur'ev, D. V. *Sposoby povysheniya tyagovykh kharakteristik stacionarnogo plazmennogo dvigatelya na rezhimakh raboty s vysokim udel'nym impul'som tyagi*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Methods of increasing of the thrust characteristics of a stationary plasma thruster operating at high specific thrust impulses. PhD diss.]. Moscow, 2015. 138 p.

Поступила в редакцию 31.05.2018, рассмотрена на редколлегии 27.07.2018

## ПРОФІЛОМЕТРОВАННЯ КРОМОК РОЗРЯДНОЇ КАМЕРИ СТАЦІОНАРНОГО ПЛАЗМОВОГО ДВИГУНА

**О. М. Хаустова, А. В. Лоян, О. П. Рибалов, Є. І. Іщенко**

В роботі показано, що одним з факторів, що впливає на тривалість роботи стаціонарного плазмового двигуна, є ресурс керамічної розрядної камери, який в свою чергу залежить від швидкості ерозії кромки ізоляторів. Для отримання кількісних даних про ступінь розвитку ерозійних процесів проводяться ресурсні випробування двигуна, з поетапним контролем зміни форми кромки розрядної камери. В роботі запропоновано декілька способів профілометрування ізоляторів двигуна. Розглянуто переваги та недоліки кожного з методів, визначені фактори, що впливають на похибку вимірювань.

**Ключові слова:** стаціонарний плазмовий двигун, розрядна камера, ресурс, ерозія

## PROFILE MEASUREMENTS OF THE STATIONARY PLASMA THRUSTER DISCHARGE CHAMBER

**A. N. Khaustova, A. V. Loyan, O. P. Ribalov, Ye. I. Ischenko**

The effectiveness of stationary plasma thrusters was proved by many years of experience of their on board operation on various spacecraft especially on geostationary orbits. One of the main factors that affects the duration of the SPT operation time is the lifetime of the edges of the discharge chamber walls. One of the factors affecting the discharge chamber lifetime is the erosion of the edges of the insulators. Ceramic wear is caused by the destruction of the high-energy ion flow that takes place in thruster plasma.

Theoretical study of the processes of discharge chamber insulators sputtering still does not allow mathematically determining the rate of development of the ceramic edges erosion processes with the necessary accuracy that is required for the SPT lifetime forecast. That is why all the researches require a full-scale testing of the thruster on a long time trial basis with subsequent measurements of the insulators value of erosion.

In this paper, several methods for measuring the degree of insulators wear are considered. The analysis of the method for measuring the thickness of the ends of discharge chamber insulators was carried out, followed by the determination of radial erosion. It has been shown that this method is the most suitable for non-separable constructions of SPT due to the high accuracy of the measurements and its simplicity.

A method for noncontact profilometry of the edges of thruster discharge chamber insulators was proposed. The use of a non-contact method allows measurements to be carried out, excluding the possibility of any deformations to the surface of insulators. Measurements were provided with the help of modern metallographic microscope. Advantages and disadvantages of the methodology are shown. The analysis of the factors that influences the error during measurements of the ceramic profile is carried out.

A method is proposed for contact profilometry of the edges of thruster discharge chamber insulators. Advantages and disadvantages of the methodology are shown. The results of measurements of the profile of the two thrusters with the construction differences are provided.

**Keywords:** stationary plasma thruster, discharge chamber, lifetime, erosion

**Хаустова Алена Николаевна** – канд. техн. наук, инж. каф. 402, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: [dissa.88@ukr.net](mailto:dissa.88@ukr.net).

**Лоян Андрей Виталиевич** – канд. техн. наук, ст. науч. сотр., руководитель отделения МНТЦ КЭД ХАИ каф. 402, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: [a.loyan@khai.edu](mailto:a.loyan@khai.edu).

**Рыбалов Олег Петрович** – науч. сотр. каф. 402, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: [a.loyan@khai.edu](mailto:a.loyan@khai.edu).

**Ищенко Евгений Иванович** – ст. науч. сотр. каф. 402, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: [a.loyan@khai.edu](mailto:a.loyan@khai.edu).

**Khaustova Alyona Nikolaevna** – PhD, engineer of spacecraft engines and power plants department, National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: [dissa.88@ukr.net](mailto:dissa.88@ukr.net).

**Loyan Andrey Vitalievich** – PhD, senior researcher, head of STC SPE KhAI of 402 of the engines and power plants of spacecraft department, National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: [a.loyan@khai.edu](mailto:a.loyan@khai.edu).

**Ribalov Oleg Petrovich** – researcher of 402 of the engines and power plants of spacecraft department, National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: [a.loyan@khai.edu](mailto:a.loyan@khai.edu).

**Ischenko Evgenii Ivanovich** – senior researcher of 402 of the engines and power plants of spacecraft department, National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: [a.loyan@khai.edu](mailto:a.loyan@khai.edu).