

УДК 533.9.07

А.В. ЛОЯН, Т.А. МАКСИМЕНКО, О.П. РЫБАЛОВ, В.А. ПОДГОРНЫЙ

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭРОЗИИ РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ МСПД В ХОДЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНЫХ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Приводятся результаты экспериментальных исследований эрозии изоляторов разрядной камеры стационарного плазменного двигателя малой мощности в ходе продолжительных (1000 ч) ресурсных испытаний. Показан характер износа кромки изолятора. Приводятся результаты сравнительного анализа эрозии изоляторов, определенной при помощи весового метода и оптической эмиссионной спектроскопии. Показано снижение скорости эрозии керамики разрядной камеры с выходом на стационарное значение после 528 ч наработки двигателя. Исходя из полученных данных по скорости эрозии, получено значение прогнозируемого ресурса двигателя – 4000 часов. Отмечено значительное распыление центральной области внутреннего полюсного наконечника магнитной системы двигателя.

Ключевые слова: стационарный плазменный двигатель, эрозия, оптическая эмиссионная спектроскопия.

Введение

Результаты испытаний стационарного плазменного двигателя малой мощности (МСПД) СПД-20М, разработанного в «ХАИ» показали, что он обладает достаточно высокими характеристиками в сравнении с мировыми аналогами: тяговый к.п.д. достигает 38% при потребляемой мощности около 100 Вт (с учетом магнитной системы и катода), тяга при этом составляет 4 мН [1]. Также одним из основных параметров двигателя, является его ресурс, который напрямую зависит от эрозии керамики разрядной камеры (РК). Для определения скорости эрозии керамики был предложен метод оптической эмиссионной спектроскопии (ОЭС) [2].

Метод ОЭС представляет собой инструмент позволяющий определить влияние режимов работы двигателя на скорость эрозии стенок РК, что также позволяет судить о расходимости струи [3]. Сравнение спектров излучения плазмы двигателя, полученных при помощи спектрометров высокого и низкого разрешений, показали, что можно достаточно адекватно выделить спектральные линии для определения эрозии керамики двигателя [4].

Ранее полученные результаты после 208 ч ресурсных испытаний двигателя [5] показали спадание скорости эрозии РК без выхода на стационарное значение по скорости эрозии. Если грубо принять, что значение скорости эрозии будет оставаться неизменным, то ресурс двигателя должен был составить 1000 часов. Поэтому для уточнения ресурсных характеристик и лучшего понимания процессов, происходящих в двигателе в ходе длительной работы, было принято решение продолжить ресурсные

испытания с контролем эрозии РК при помощи ОЭС и весового метода, а также профилометрии эродирующей кромки РК.

Целью исследований, приводимых в данной работе, было определение ресурсных характеристик МСПД на заданном режиме, определение эрозии керамики РК весовым методом и при помощи ОЭС и их сравнительный анализ после продолжительных испытаний.

Результаты исследований

Исследования эрозии РК были продолжены на ранее описанной [5] специальной модели двигателя СПД-20М, конструкция которой позволяет извлекать керамические вставки для прямого контроля эрозии. Двигатель работал при анодном массовом расходе – 0,216 мг/с; разрядное напряжение составляло – 300 В. Для изготовления керамики РК был использован АБН (BN+AlN). Для обеих керамических вставок (внутренней и внешней) проводился весовой контроль эрозии. Для внутренней вставки проводился контроль изменения профиля эродирующей кромки. На рис. 1 видно как со временем изменяется угол износа внутренней керамики. Уже при 590 ч наработки наблюдается небольшой участок на кромке, который изнашивается в соответствии с углом раскрытия струи, по мере приближения к оси распыление происходит по торцу. Также отмечено значительное распыление внутреннего полюсного наконечника, в большей мере проявляющееся по оси двигателя. На рис. 2 показана эрозия двигателя чрез (а) 83 и (б) 992 ч наработки. Хорошо видна «воронка» по оси сердечника магнитопрово-

да, а также следы повышенной эрозии по внутренней части кольца защитной крышки. Такая конфигурация эродирующей поверхности характерна для МСПД и может быть связана с бомбардировкой частиц с высокими энергиями, концентрация которых увеличивается с увеличением плотности магнитных силовых линий вблизи полюсов в так называемой

«магнитной пробке». Это явление требует дальнейшего изучения для более подробного объяснения. Ранее уже проводились исследования плазмы вблизи среза МСПД при помощи зонда Ленгмюра, которые показали повышенную плотность плазмы вблизи центра полюсного наконечника [1].

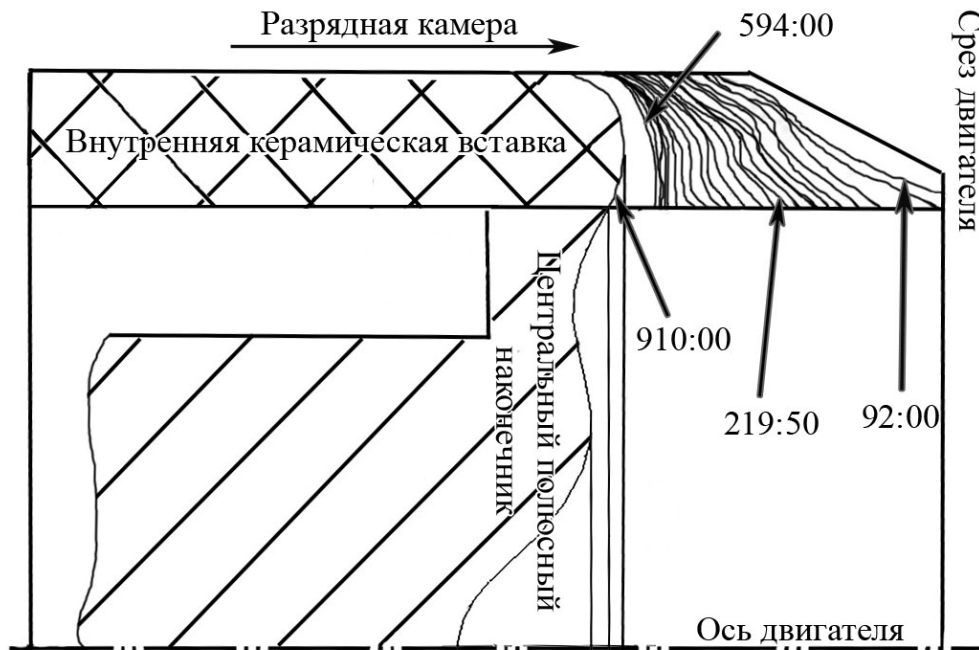


Рис. 1. Изменение профиля внутренней керамики в процессе работы двигателя (отмечено время наработки в часах)

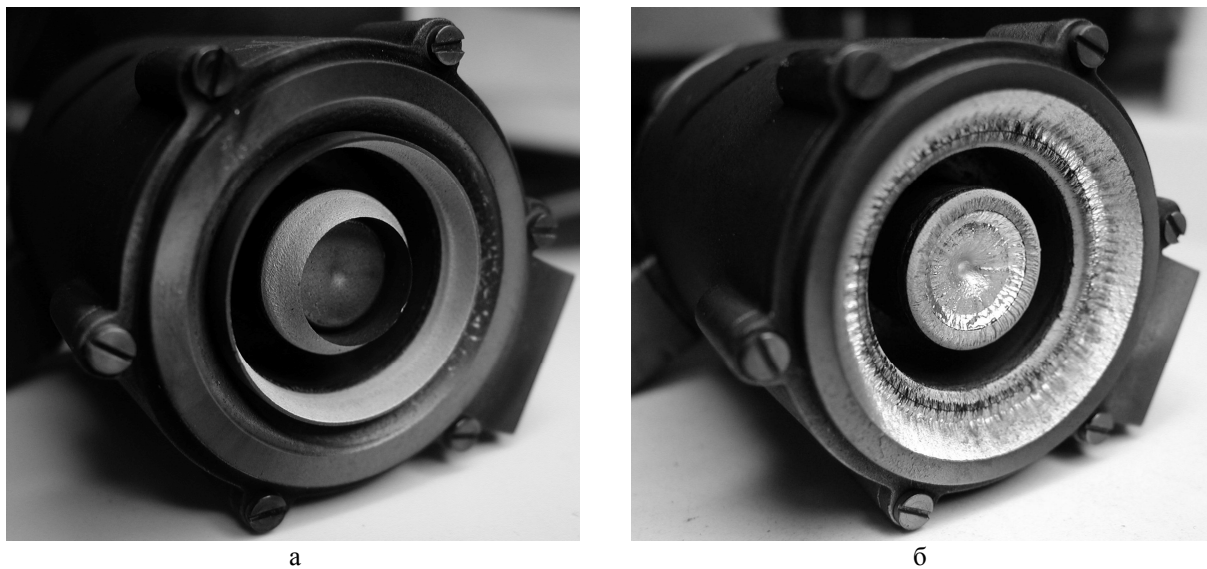


Рис. 2. Эрозия СПД-20М:
а – 83 ч наработки; б – 992 ч

Был проведен сравнительный анализ данных полученных при помощи ОЭС и при помощи весового метода. На рис. 3 представлены зависимости относительной скорости эрозии (пронормировано по максимальному значению для возможности сравнения) от

времени наработки двигателя.

Из полученных результатов видна область приработки в течение 144 ч, затем до определенного момента (325 ч) наблюдается спадание скорости эрозии, при этом ОЭС отображает в основ-

ном эрозию внутренней керамики, а не общую скорость эрозии, как это можно было ожидать. Затем спадание замедляется и наблюдается корреляция данных по скорости эрозии, полученных при помощи ОЭС с общей скоростью эрозии, полученной весовым методом. Скорость эрозии снижается и выходит на стабильное значение приблизительно через 528 часов наработки, с этого момента скорость эрозии внешней

и внутренней керамики близки по значению (около 2 мг/с). После 720 ч наработки ОЭС показывает несколько повышенную скорость эрозии, что может быть связано с рядом сторонних факторов. Однако метод в целом правильно отображает характер изменения скорости эрозии во времени и позволяет определить корреляционный коэффициент необходимый для количественного анализа.

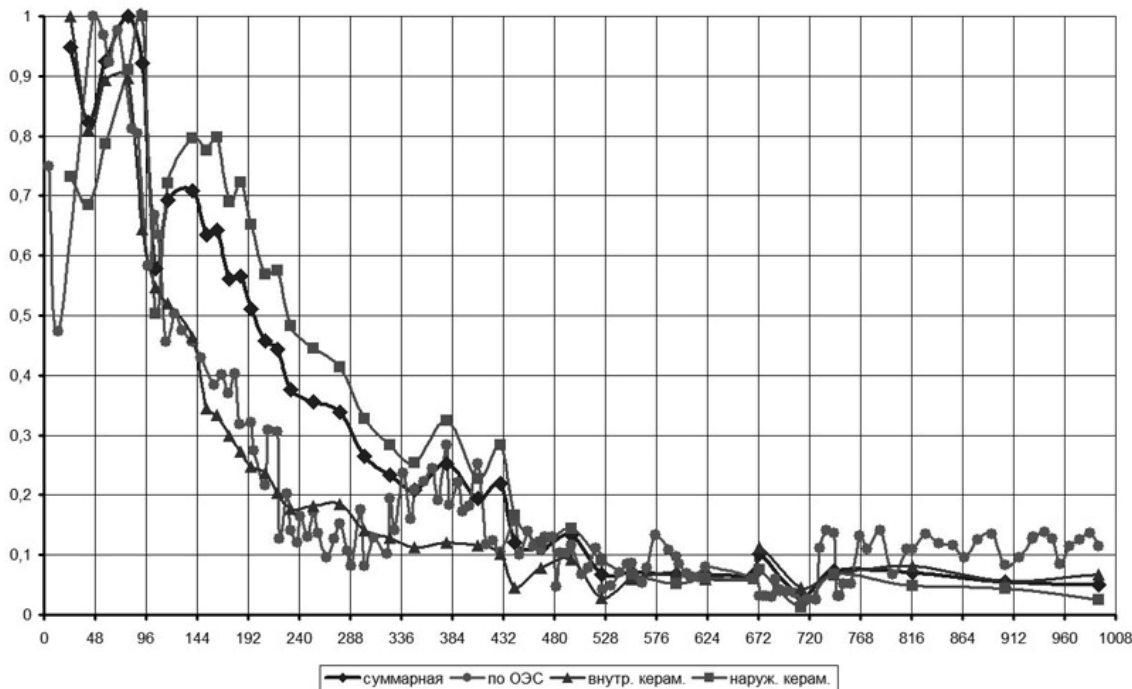


Рис. 3. Зависимость относительной скорости эрозии от времени

Анализ полученных данных позволяет сделать новую оценку ресурса двигателя. Если предположить, что параметры двигателя не претерпят критических изменений, пока керамика не распылится по длине еще на 1 мм, и что скорость эрозии останется на уровне стационарного значения, то значение ресурса составит приблизительно 4000 часов. Данное значение ресурса может быть увеличено приблизительно в 8 раз без снижения эффективности двигателя [1, 6] за счет применения керамики на основе монокристалла оксида алюминия со специальными присадками.

Выводы и перспективы дальнейших исследований

В ходе продолжительных (1000 ч) ресурсных испытаний СПД-20М исследован характер износа кромки изолятора РК, проведен сравнительный анализ скорости эрозии при помощи весового метода и ОЭС. Определено время выхода скорости эрозии на стационарное значение. По вновь полученным данным спрогнозировано значение ресурса двигателя в 4000 ч, которое может быть увеличено в несколько раз за

счет применения другой керамики без снижения характеристик двигателя. Также отмечено значительное распыление центральной области внутреннего полюсного наконечника магнитной системы двигателя и необходимость более подробного изучения данного явления.

В продолжение данных исследований планируется проведение бортовых испытаний двигателя с контролем скорости эрозии при помощи ОЭС для сравнения с данными полученными на испытательном стенде.

Данные исследования частично поддерживались Французско-Украинской программой «Днипро-2007». Авторы статьи приносят благодарность Кислицыну А.П. и французским коллегам D. Pagnon и M. Dudeck за ценные замечания и обсуждение результатов.

Литература

1. Loyan A.V. Performance investigation of SPT-20M Low Power Hall Effect Thruster / A.V. Loyan, T.A. Maksymenko // 30th Int. Electric Propulsion Conference, Florence, Italy, 16-20 Sept. 2007. – IEPC2007-100.

2. Pagnon D. Control of the ceramic erosion by Optical Emission Spectroscopy, Results of SPT100-ML measurements / D. Pagnon, P. Lasgorceix, M. Touzeau // 40th AIAA Joint Propulsion Conference, Fort Lauderdale, Florida, 2004. – AIAA2004-3773.

3. Ukrainian SPT-20 Hall Effect Thruster: Analysis of the Plume by Optical Emission Spectroscopy / D. Pagnon, S. Pellerin, M. Dudeck, A.V. Loyal, T.A. Maksymenko, N.N. Koshelev // 30th Int. Electric Propulsion Conference, Florence, Italy, 16-20 Sept. 2007. – IEPC2007-361.

4. Plume Investigator of the SPT-20M Low Power Hall Effect Thruster / A.V. Loyal, T.A. Maksymenko, N.N. Koshelev, D. Pagnon, S. Pellerin, A. Leufroy,

T. Gibert, A. Bouchoule, M. Dudeck // Space propulsion conference, Heraklion, Greece, 5-9 May 2008.

5. Лоян А.В. Экспериментальные исследования ресурсных характеристик МСПД / А.В. Лоян, Т.А. Максименко, В.А. Подгорный // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 9 (56). – С. 44-47.

6. Максименко Т.А. Холловский двигатель малой мощности для систем коррекции орбиты малых мини и микроспутников / Т.А. Максименко, А.В. Лоян, Н.Н. Кошелев // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 9 (25). – С. 140-144.

Поступила в редакцию 12.05.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.И. Оранский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕРОЗІЇ РОЗРЯДНОЇ КАМЕРИ МСПД ПРОТЯГОМ ТРИВАЛИХ РЕСУРСНИХ ВИПРОБУВАНЬ

А.В. Лоян, Т.О. Максименко, О.П. Рибалов, В.О. Подгорний

Наведено результати експериментальних досліджень ерозії ізоляторів розрядної камери (РК) стаціонарного плазмового двигуна малої потужності протягом тривалих (1000 год.) ресурсних випробувань. Показано характер зношування кромки ізолятора. Наведено результати порівняльного аналізу ерозії ізоляторів, визначеної за допомогою вагового методу та оптичної емісійної спектроскопії. Показано зниження швидкості ерозії кераміки РК з виходом на стаціонарне значення після 528 год. роботи двигуна. Виходячи з отриманих даних за швидкістю ерозії, отримано значення прогнозованого ресурсу двигуна – 4000 год. Відзначено значне розпилення центральної області внутрішнього полюсного наконечника магнітної системи двигуна.

Ключові слова: стаціонарний плазмовий двигун, ерозія, оптична емісійна спектроскопія.

THE INVESTIGATIONS OF EROSION OF DISCHARGE CHAMBER OF LOW POWER STATIONARY PLASMA THRUSTER DURING LONG-CONTINUED LIFETIME TEST

A.V. Loyal, T.A. Maksymenko, O.P. Rybalov, V.A. Podgorny

The results of experimental investigation of erosion of isolators of discharge chamber of low power stationary plasma thruster during long-continued (1000 hours) lifetime test are represented. Character of isolator edge wear is shown. The results of comparison analysis of isolators erosion determined by weight method and optical emission spectroscopy are represented. Decrease of erosion rate of ceramic and saturation after 528 hours of thruster work are shown. Value of thruster predicated lifetime 4000 hours was calculated from new data of erosion rate. Significant sputtering of central pole of magnetic system was noted.

Key words: stationary plasma thruster, erosion, optical emission spectroscopy.

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.

Максименко Тарас Александрович – научный сотрудник кафедры двигателей и энергоустановок летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: taras@d4.khai.edu.

Рибалов Олег Петрович – младший научный сотрудник кафедры двигателей и энергоустановок летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Подгорный Валентин Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры двигателей и энергоустановок летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.