

УДК 533.9.07

**А.В. ЛОЯН, Т.А. МАКСИМЕНКО, В.А. ПОДГОРНЫЙ***Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
РЕСУРСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МСПД**

Приводятся результаты экспериментальных исследований эрозии изоляторов разрядной камеры стационарного плазменного двигателя малой мощности. Показан характер износа изоляторов, отмечено наличие зон нормальной и «аномальной эрозии». Приводятся результаты сравнительного анализа эрозии изоляторов, определенной при помощи весового метода и оптической эмиссионной спектроскопии. Показано, что данные, полученные по эрозии при помощи ОЭС, коррелируют в большей мере с эрозией внутреннего изолятора, что является следствием различных условий возбуждения атомов алюминия, ушедших с наружного и внутреннего изоляторов, из-за различия концентраций электронов в центральной и периферийной зонах факела.

**стационарный плазменный двигатель, эрозия, оптическая эмиссионная спектроскопия****Введение**

**Общая постановка проблемы и ее связь с научно-практическими задачами.** Хорошо известно и достаточно очевидно, что для технических устройств вообще и космической техники в частности очень важными характеристиками являются: гарантируемый срок службы, время безотказной работы, надежность устройства. Всесторонние испытания опытных образцов ЭРД, проводимые с целью подготовки летных экземпляров, на определенном этапе предполагают проведения ресурсных испытаний. Они могут быть организованы как прогнозирование ресурса по предварительным испытаниям, проведение ускоренных испытаний или же полной наработки на отказ. В любом случае это связано со значительными затратами ввиду того, что необходимые значения по ресурсу ЭРДУ составляют тысячи часов.

**Обзор публикаций и анализ нерешенных проблем.** При работе стационарного плазменного двигателя (СПД) его конструкционные элементы двигателя, особенно стенки разрядной камеры (РК), подвергаются воздействию со стороны плазмы, которое состоит в бомбардировке ионами, электронами, и нейтральными атомами. Эти воздействия совместно

с радиационным разогревом элементов приводят к эрозии РК двигателя, что в первую очередь сопровождается изменением геометрической формы керамических стенок, выработка которых в итоге приводит к изменению рабочих характеристик двигателя [1].

Контроль эрозии осуществляется либо непосредственными методами (визуальный, профилометрический и весовой), либо косвенными, одним из которых является метод оптической эмиссионной спектроскопии (ОЭС) состава плазмы факела СПД. Непосредственные методы дают наиболее достоверную информацию, но в большинстве случаев требуют проведения разборки двигателя на элементы и последующую его сборку, что приводит к эпизодическому контролю эрозии. Методы ОЭС не требуют остановки, а тем более разборки двигателя, что дает возможность организации постоянного контроля. Но в большинстве случаев они дают только качественную [2], а в лучшем случае полуколичественную [3] информацию об эрозии. Таким образом, на сегодняшний момент оптимальным лабораторным методом контроля динамики эрозии элементов рабочего канала СПД можно считать совмещающий непосредственный и ОЭС методы.

**Цель исследований.** Целью исследований, проводимых 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.

### Результаты исследований

Для обеспечения непосредственного контроля эрозии керамических изоляторов РК МСПД была изготовлена модификация двигателя, допускающая достаточно простое извлечение изоляторов из алюмонитрида бора (АБН) (рис. 1).

В качестве рабочего режима МСПД был выбран следующий: анодный массовый расход – 0,216 мг/с; разрядное напряжение – 300В. Режим работы не является оптимальным с точки зрения КПД. В этом режиме, как показали предварительные исследования, ожидается повышенная эрозия изоляторов РК.



Рис.1. Модифицированный МСПД после 83 часов и 38 минут работы

В процессе испытаний осуществлялся постоянный контроль относительного коэффициента эрозии методом ОЭС по соотношению интенсивностей линий Al-I (396nm), Xe-I (823 nm) и Xe-II(484nm) [4, 5] и периодический непосредственный контроль весовым методом. Для обеих керамических вставок осуществлялся весовой и визуальный контроль, а для внутренней вставки производился контроль изменения профиля эродирующей кромки (рис. 2).

В процессе испытаний было выявлено наличие нескольких характерных зон эрозии изолятора

(рис. 3): нормальной и «аномальной» (ранее описанной в [6]), которая проявляется по мере приближения к полюсному наконечнику и снова переходит в нормальную. Зона нормальной эрозии характеризуется гладкой поверхностью и менее значительным изменением геометрии изолятора в глубине РК. Зона «аномальной» эрозии характеризуется наличием регулярной структуры, состоящей из радиальных канавок и более значительным изменением геометрии. По мере работы двигателя область занятая «аномальной» эрозией уменьшается.

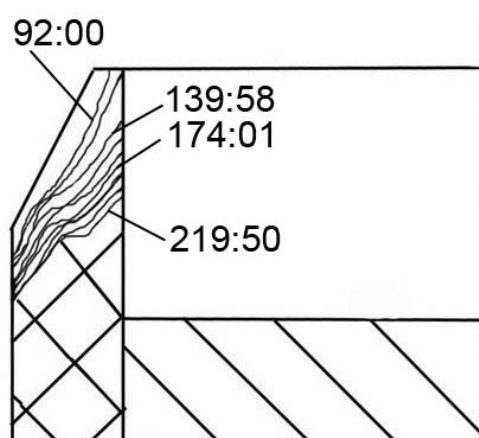


Рис. 2. Изменение профиля внутренней керамики в процессе работы двигателя (отмечено время наработки в часах)

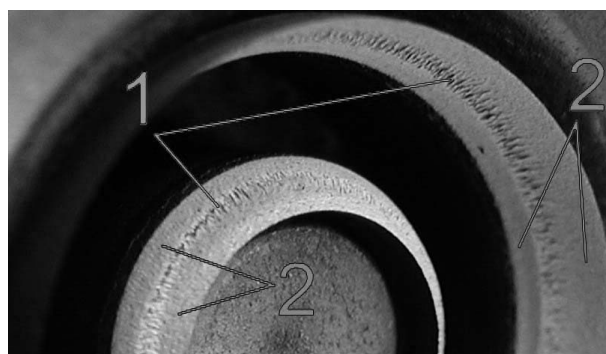


Рис. 3. Эрозия изоляторов: 1 – «аномальная»; 2 – нормальная

Как показали измерения, скорость износа внешней и внутренней керамики на начальном этапе была приблизительно одинаковой, после 92 часов работы двигателя скорость эрозии внутренней керамики заметно снизилась, что хорошо видно из зависимостей на рис. 4. Также на данном рисунке для сравнения приведены данные по эрозии, получен-

ные при помощи ОЭС (в условных единицах размерности), из которых видно явное изменение режима эрозии. Для сравнительного анализа зависи-

мости суммарной эрозии, эрозии внутренней керамики и полученные при помощи ОЭС были пронормированы и построены на общем графике (рис. 5)

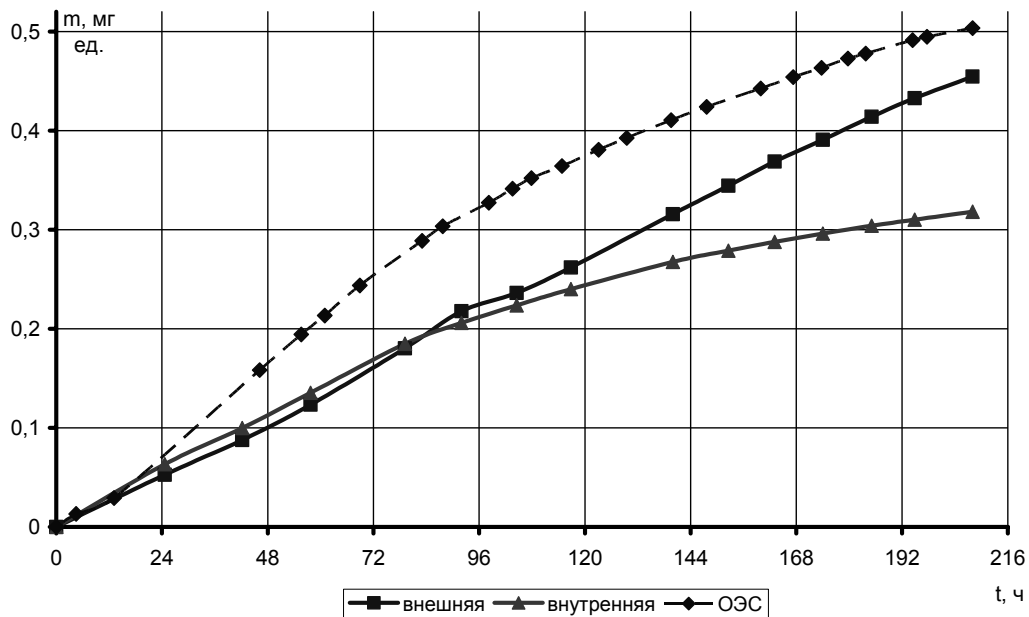


Рис. 4. Количество унесенной массы керамики

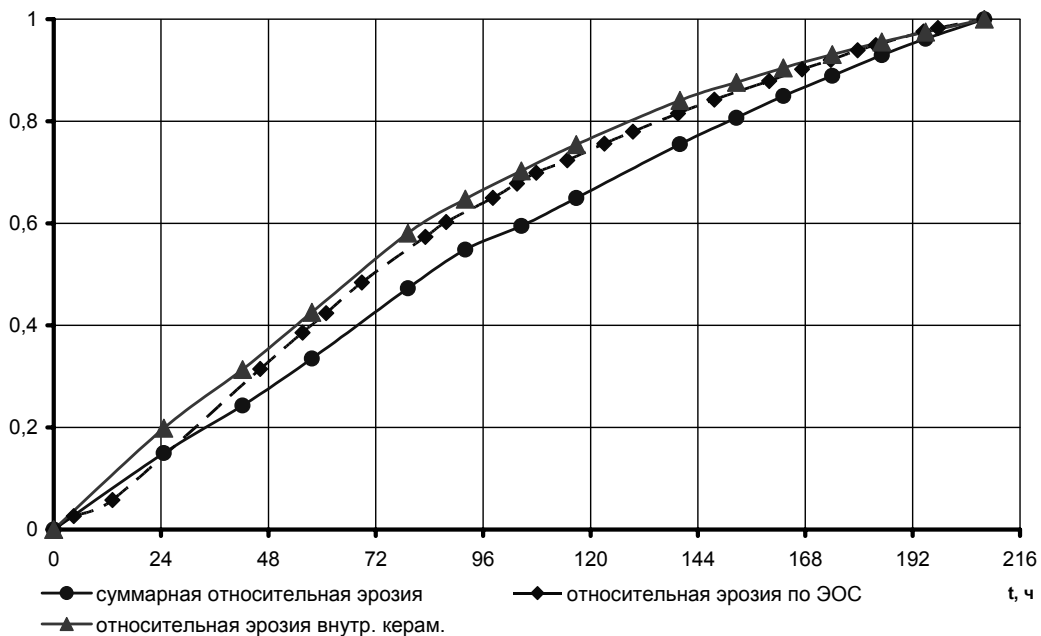


Рис. 5. Зависимость относительной эрозии от времени

Анализируя характер зависимостей можно сказать, что данные, полученные по эрозии при помощи ОЭС, коррелируют в большей мере с эрозией внутренней керамики, а не с суммарной. Это можно объяснить тем, что в центре струи за счет кривизны МСЛ находится зона повышенной плотности плаз-

мы, в которую главным образом и происходит вынесение распыленной керамики центрального изолятора, где происходят активные процессы возбуждения-девозбуждения атомов. В то же время за счет угла раскрытия струи, продукты распыления внешнего изолятора выносятся в зону разреженной плаз-

мы, где вероятность их взаимодействия с высокоэнергетическими частицами значительно меньше. Также описанный эффект может объясняться тем, что на чувствительный элемент спектрометра попадает излучение не полностью, а лишь из определенного участка сфокусированного изображения. Полученные результаты позволяют определить калибровочный коэффициент для расчета эрозии керамики центрального изолятора РК МСПД при данном режиме работы, которая большей частью и определяет ресурсные характеристики двигателя.

### Перспективы дальнейших исследований

Продолжение испытаний МСПД позволят определить его реальный ресурс при заданном режиме. Также необходимо провести дополнительные исследования влияния режима работы двигателя на показания эрозии, полученные при помощи ОЭС, что позволит перейти к полному количественному анализу эрозии керамики РК при помощи ОЭС.

### Выводы

В процессе ресурсных испытаний МСПД на заданном режиме выявлен характер износа керамики РК, отмечено наличие зон нормальной и аномальной эрозии. Определена эрозия керамики РК при помощи весового метода и ОЭС. Их сравнительный анализ показал, что данные полученные по эрозии при помощи ОЭС коррелируют в большей мере с эрозией внутренней керамики.

Авторы работы приносят благодарность А.П. Кислицыну и французским коллегам D. Pagnon и M. Dudeck за ценные замечания и обсуждение результатов, а также за любезно предоставленный спектрометр HR2000.

Работа проводилась в рамках международного проекта "Dnipro-France 2007".

### Литература

1. Стационарные плазменные двигатели: Учебное пособие / Н.В. Белан, В.П. Ким, А.И. Оранский, В.Б. Тихонов. – Х.: ХАИ, 1989. – 315 с.
2. Pagnon D., Lasgorceix P., Touzeau M. Control of the ceramic erosion by Optical Emission Spectroscopy, Results of PPS1350-G measurements // 4th ISPC, Cagliari, Sardinia. – 2004.
3. Спектроскопические исследования струи ХД с целью определения скорости эрозии ускорительного канала в ходе длительных ресурсных испытаний / Н.В. Блинов, Ю.М. Головин, О.А. Горшков, Е.Н. Дышлюк, А.А. Шагайда // Авиационно-космическая техника и технология: – 2005. – № 9 (25). – С. 123-127.
4. Optical emission spectroscopy measurements on a SPT-20 hall effect thruster on the KNAI ground test facility / D. Pagnon, S. Pellerin, M. Dudeck, T.A. Maksimenko, N.N. Koshelev, A.V. Loyan // Aerospace technic and technology. – 2006. – № 10 (36). – P. 117-122.
5. Ukrainian SPT-20 Hall Effect Thruster: Analysis of the Plume by Optical Emission Spectroscopy / D. Pagnon, S. Pellerin, M. Dudeck, A.V. Loyan, T.A. Maksymenko, N.N. Koshelev // IEPC-2007-361, 30d IEPC, Florence, Italy, September 17-20, 2007.
6. Аномальная эрозия диэлектрика под действием плазменного потока / Б.А. Архипов, Р.Ю. Гниздор, В.А. Масленников, А.И. Морозов // Физика плазмы. – 1992. – Т. 18, № 9. – С. 1241-1244.

Поступила в редакцию 29.05.2008

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