

УДК 533.59,620.168

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭРОЗИИ УСКОРЯЮЩЕГО ЭЛЕКТРОДА ДВУХЭЛЕКТРОДНОЙ ИОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИСТОЧНИКА ИОНОВ

© 2019 г. Р. В. Ахметжанов¹ *, А. В. Богатый¹, Е. В. Воробьев², Д. В. Духопельников²,
Д. А. Каширин¹, В. А. Обухов¹, Г. А. Попов¹, В. В. Свотина¹, М. В. Черкасова¹

¹Научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики
Московского авиационного института (Национального исследовательского университета), Москва, 125993 Россия

²Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(Национальный исследовательский университет), Москва, 105005 Россия

*E-mail: ahmetzhanov1991@mail.ru

Поступила в редакцию 05.04.2019 г.

После доработки 06.05.2019 г.

Принята к публикации 15.06.2019 г.

Представлено расчетное и экспериментальное исследование скорости эрозии ускоряющего электрода источника ионов (ионного двигателя). При распространении ионного пучка за срезом двигателя в его объеме в результате резонансной перезарядки образуются медленные ионы, которые под действием отрицательного электрического потенциала ускоряющего электрода бомбардируют его поверхность, обращенную в сторону истекающего пучка. Эрозия ускоряющего электрода из-за бомбардировки ионами перезарядки является основным фактором, ограничивающим ресурс ионного двигателя. Предварительно нанесенное на поверхность электрода 25-слойное покрытие из оптически контрастных слоев меди и хрома использовалось для диагностики скорости распыления. Полное время экспозиции составило 14 ч. Профиль каверны фиксировался каждые 3–5 часов, в результате была определена зависимость роста глубины каверны от времени. Полученные в эксперименте данные использовались в качестве исходных для проведения численного 3D-моделирования эрозии многослойного покрытия при условиях, соответствующих условиям проведенных экспериментов. На основании полученных результатов ресурс исследуемого двигателя был оценен в 13800 часов по износу титанового электрода при потенциале на нем минус 500 В.

Ключевые слова: источник ионов, ионный двигатель, ионно-оптическая система, укороченные ресурсные испытания, эрозия, ионы перезарядки.

DOI: 10.1134/S1028096019120021

ВВЕДЕНИЕ

Развитие космической техники требует создания ракетных двигателей космических аппаратов (КА) с высокой скоростью истечения рабочего вещества (в технической терминологии – с высоким удельным импульсом тяги). Так, в третьей четверти прошлого века появились и начали активно применяться плазменные [1] и ионные двигатели (ИД) [2], составившие класс электроракетных двигателей (ЭРД). Особенность эксплуатации ЭРД на КА обусловлена необходимостью их длительной работы: от нескольких тысяч до десятков тысяч часов. Одним из основных преимуществ ИД по сравнению с ЭРД других типов является достижение высокого ресурса, который может составлять несколько десятков тысяч часов [3]. Ионный двигатель представляет собой

газоразрядный источник ионов с трехэлектродной электростатической системой формирования и ускорения ионов, обычно используется термин “ионно-оптическая система” (ИОС). В силу этого, все проблемы, рассматриваемые в данной статье применительно к ИД, распространяются и на технологические источники ионов. В работе [4] показано, что ресурс ИД в целом определяется процессами, протекающими в ИОС. Принципиальное ограничение ресурса обусловлено эрозией ускоряющего электрода ИОС из-за его бомбардировки ионами перезарядки. При этом наибольшая скорость эрозии вызвана воздействием ионов перезарядки, образующихся за срезом двигателя в зоне нейтрализации ионного пучка. При разработке ИД вопрос ресурса является принципиальным: решение конкретной задачи на борту КА требует определенной наработки двигателя. В хо-

де испытаний ресурс двигателя должен быть подтвержден. В [4] проведено расчетное исследование процесса эрозии, приведена оценка ресурса ИД при типичных параметрах газоразрядной плазмы и плотности ионного тока, однако исключительно расчетного подтверждения ресурса недостаточно.

С другой стороны, проведение длительных ресурсных испытаний ИД требует больших временных (свыше 10000 часов непрерывной работы) и финансовых затрат. Поэтому одной из важнейших задач при создании и исследованиях ИД является разработка надежных методик ускоренных испытаний, при которых полученная за небольшое время испытаний информация используется для расчета времени, за которое достигается предельно допустимая глубина эрозии. Такая методика должна базироваться на надежном способе экспериментального определения динамики эрозии при использовании диагностических средств, не требующих для измерения параметров эрозии разборки двигателя и на надежном программном обеспечении для проведения расчетного исследования.

Целью данной работы является экспериментальное и расчетное исследование эрозии ускоряющего электрода ИД для обоснования предлагаемой методики ускоренных ресурсных испытаний. Экспериментальное исследование основано на способе диагностики эрозии с использованием многослойных контрастных покрытий, разработанных авторами в работах [5, 6]. В работе [6] приведено сравнение данного способа с известными методиками из литературных источников, и отражена история вопроса. В [6] показаны также перспективы использования программного комплекса 3D IOS [7] для проведения расчетного исследования ресурсных проблем.

Таким образом, методика ускоренных ресурсных испытаний должна базироваться на информации о скорости и характере износа УЭ, полученной экспериментально на начальном этапе испытаний двигателя. Экспериментальные исследования должны сопровождаться теоретическим расчетом на основании моделей износа, подтверждаемых в ходе проведения испытаний. Полученные в эксперименте результаты должны использоваться для корректировки моделей эрозии УЭ, учитывая изменение характера и скорости износа во времени. Методика, отвечающая этим условиям, позволит за счет объединения теоретических и экспериментальных результатов повысить надежность прогноза ресурса, как одной из важнейших характеристик двигателя.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Качественно характер эрозии УЭ проявляется уже в течение первых десяти часов испытаний. Наибольшее количество ионов перезарядки выпадает на УЭ из зоны нейтрализации пучка ионов, образуя на поверхности УЭ, обращенной к зоне

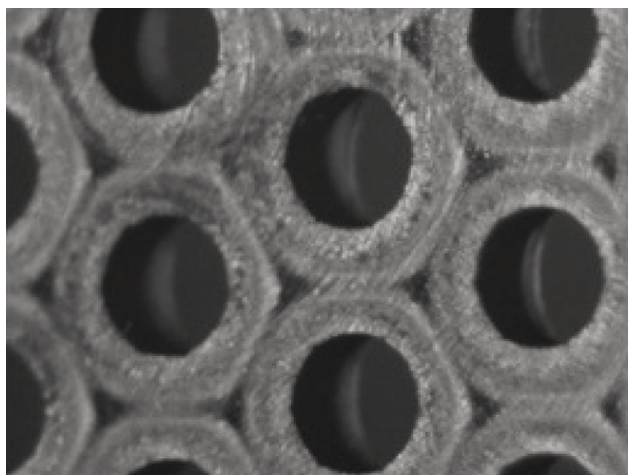


Рис. 1. Фотографии поверхности ускоряющего электрода двигателя РИТ-22.

нейтрализации, характерную картину эрозии: распределение “ямок и канавок” (рис. 1) [8].

Количественно, тем не менее, определить эрозию с применением обычных приборов без прерывания испытаний и разборки двигателя невозможно.

Эксперимент

Эксперимент по определению скорости эрозии УЭ проводился для высокочастотного ионного двигателя малой мощности ВЧИД ММ [9]. На поверхность УЭ, обращенную к зоне нейтрализации, было нанесено многослойное покрытие из 25 чередующихся слоев хрома и меди с толщинами соответственно 118 и 205 нм. В ходе работы ВЧИД плотность тока ионного пучка и, как следствие, плотность тока ионов перезарядки, достигают своих максимальных значений в области центрального отверстия ИОС [10]. Было необходимо исключить влияние факторов, которые в ходе эксперимента могли бы повлиять на точность измерений. В частности, как показали предварительные эксперименты, элементарные пучки ионов из периферийных отверстий ИОС имеют значительный угол расходимости и могут задевать замедляющий электрод, вызывая распыление его материала. При этом материал замедляющего электрода напыляется на УЭ, что нарушает чистоту проведения эксперимента. В связи с этим отверстия ИОС, лежащие в периферийной части ЭЭ, были закрыты алюминиевым экраном (рис. 2). Открытым остался участок ИОС в виде правильного шестиугольника со стороной 32 мм, на котором находилось 70% отверстий.

Экспериментальный образец характеризуется следующими параметрами: ток пучка ионов составляет 80 мА, средняя по отверстию в ЭЭ плотность ионного тока 75 А/м², среднее значение тока элементарной ячейки 0.37 мА, среднее значение тока ионов перезарядки на УЭ 1.9 мА, средняя по поверхности УЭ плотность тока ионов перезаряд-

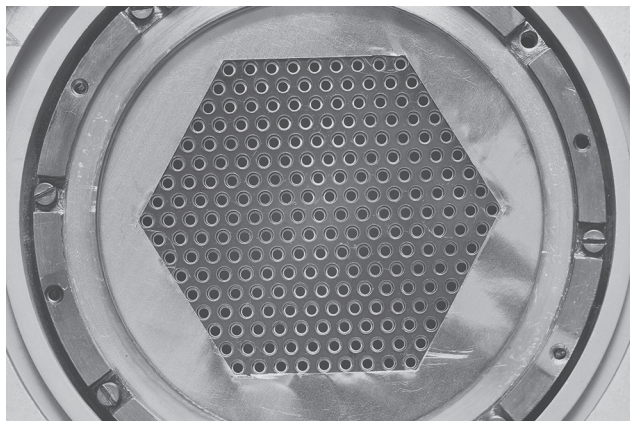


Рис. 2. Экран, закрывающий периферийные отверстия ИОС исследуемой модели.

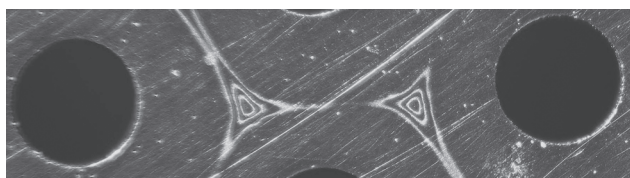


Рис. 3. Профиль эрозии поверхности электрода после трех часов работы двигателя.

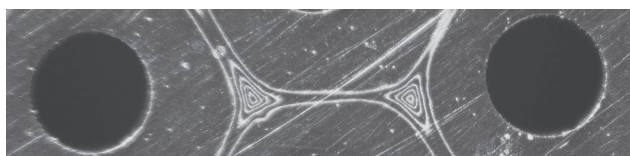


Рис. 4. Профиль эрозии поверхности электрода после пяти часов работы двигателя.

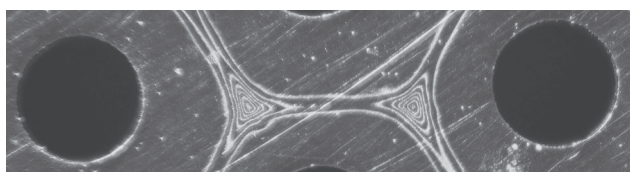


Рис. 5. Профиль эрозии поверхности электрода после восьми часов работы двигателя.

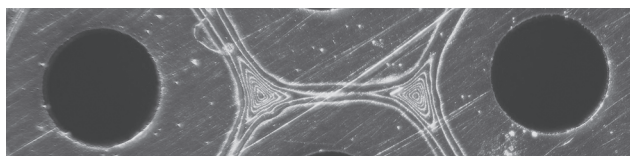


Рис. 6. Профиль эрозии поверхности электрода после десяти часов работы двигателя.

ки 0.7 А/м^2 , потенциал ЭЭ составил 2000 В , потенциал УЭ составил -500 В .

Испытания проводились вплоть до полного распыления многослойного покрытия хотя бы в одной области поверхности. Уже после трех часов работы на поверхности УЭ четко проявлялась картина износа, образованная контрастными слоями хрома и меди. При дальнейшей работе появлялись все новые слои. Регистрация картины распыления производилась фотографированием тыльной стороны УЭ через каждые $3-5 \text{ ч}$ наработки, что позволило определить динамику эрозии, при этом четкая картина эрозии надежно фиксировалась. Время сквозного травления покрытия составило 14 ч [11]. Фотографии картины распыления многослойного покрытия представлены на рис. 3–8. Фотография (рис. 8) получена с использованием микроскопа, остальные — с помощью фотоаппарата.

Как видно из представленных рисунков, максимальная глубина эрозии, а, следовательно, и максимальная плотность тока ионов перезарядки наблюдается в областях поверхности, равноудаленных от трех соседних отверстий, что соответствует экспериментальным и расчетным данным, полученным для ИД в исследованиях, проведенных ранее (например, [8]). Вблизи отверстий плотность ионного тока мала. В этих областях после 14 ч работы не был распылен даже первый слой покрытия. Лишь на кромках отверстий проявились следы эрозии. Изменение глубины эрозии по времени показано на рис. 9.

Необходимо отметить, что положения минимумов на графиках зависимостей, полученных по фотографиям на стенде, отличаются от положения минимумов на графике, полученном по фотографии. Это может быть связано с хроматическими aberrациями оптической системы (объектив фотоаппарата + объективная линза) и возможным искажением перспективы при фотосъемке. Последнее является следствием не параллельности передней линзы и поверхности УЭ, а также несовершенством самой системы. В результате измерения профиля по фотографиям на стенде содержат систематическую ошибку (положения минимумов на всех таких графиках совпадают). Микрофотографии лишены таких недостатков и имеют значительно более высокое разрешение, поэтому наиболее точное вычисление профиля травления получено для 14 ч работы уже после разборки узла ИОС.

Обработка полученных результатов эксперимента

За время dt в результате распыления ионами с элемента поверхности dA уносится масса dm вещества, равная:

$$dm = \frac{M_a S(\varepsilon_i)}{q} dI dt = \frac{M_a S(\varepsilon_i)}{q} j dA dt, \quad (1)$$

где M_a – масса атома распыляемого вещества; $S(\epsilon_i)$ – коэффициент распыления, зависящий от энергии ионов ϵ_i ; j – плотность тока ионов перезарядки; q – заряд иона. Глубина эрозии h при нормальном падении ионов за время t составит:

$$K = h \frac{j}{q}, \quad (2)$$

где K – коэффициент, пропорциональный скорости распыления материала:

$$K = \frac{M_{ai} S_i}{\rho_i}, \quad (3)$$

где ρ_i плотность распыляемого материала.

$$t_{\text{СКВ}} = \frac{nq}{j_{\text{max}}} \left(\frac{\rho_1 \delta_1}{M_{a1} S_1} + \frac{\rho_2 \delta_2}{M_{a2} S_2} \right), \quad (4)$$

При использовании для многослойного покрытия материалов с повышенными, по сравнению с материалом электродов, коэффициентами ионного распыления появляется возможность проведения ускоренных по времени эрозионных испытаний, что и реализовано в эксперименте.

Как следует из (4), слой однородного материала электрода толщиной $n(\delta_1 + \delta_2)$ с параметрами M_{a0} , S , будет распылен за время:

$$t_0 = \frac{nq(\delta_1 + \delta_2)\rho_0}{M_{a0} S_0 j_{\text{max}}}. \quad (5)$$

Тогда из (4) и (5) расчетный коэффициент сокращения времени испытаний по определению скорости износа электрода составит:

$$N = \frac{(\delta_1 + \delta_2)\rho_0}{M_{a0} S_0 (\epsilon_i)} \cdot \frac{1}{\frac{\rho_1 \delta_1}{M_{a1} S_1 (\epsilon_i)} + \frac{\rho_2 \delta_2}{M_{a2} S_2 (\epsilon_i)}}, \quad (6)$$

где N – коэффициент сокращения времени испытания.

В эксперименте энергия ионов перезарядки, выпадающих на ускоряющий электрод в соответствии с его электрическим потенциалом, составляла 500 эВ. При такой энергии коэффициенты распыления материалов слоев равны [12]: $S_{\text{Cr}} = 1.55$, $S_{\text{Cu}} = 2.08$. Тогда полученный из (6) коэффициент сокращения времени испытания составил $Y = 2.97$.

Почти тройное время сокращения испытаний само по себе представляется важным результатом. Но более существенным результатом применения методики многослойного покрытия является возможность определения динамики эрозии электрода за короткое время и возможность получения исходных данных для проведения последующего расчета.

Так, по величине эрозии можно определить распределение плотности ионного тока перезарядки и его максимальное значение по формуле:

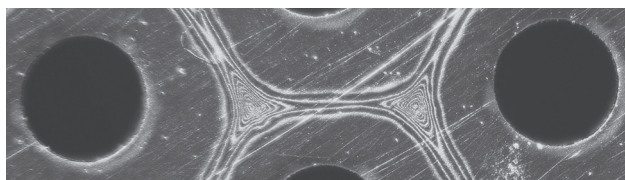


Рис. 7. Профиль эрозии поверхности электрода после двенадцати часов работы двигателя.

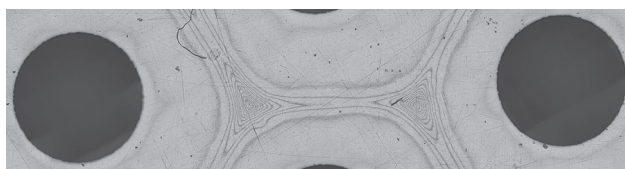


Рис. 8. Профиль эрозии поверхности электрода после четырнадцати часов работы двигателя.

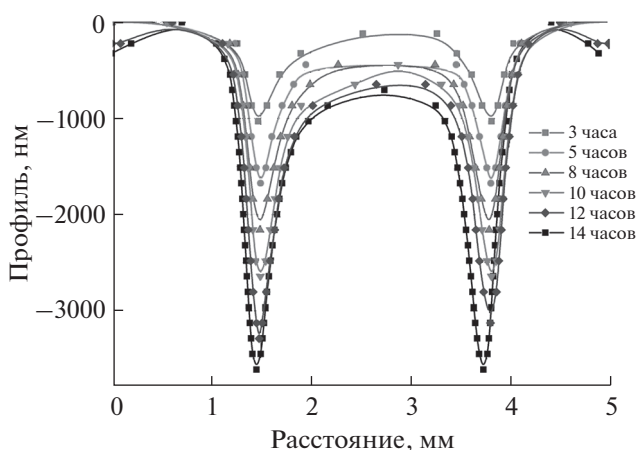


Рис. 9. Динамика изменения глубины эрозии УЭ в ходе проведения эксперимента.

$$j_{\text{max}} = \frac{q}{t_{\text{СКВ}}} \left(\frac{n_{\text{Cr}} \rho_{\text{Cr}} \delta_{\text{Cr}}}{M_{\text{aCr}} S_{\text{Cr}}} + \frac{n_{\text{Cu}} \rho_{\text{Cu}} \delta_{\text{Cu}}}{M_{\text{aCu}} S_{\text{Cu}}} \right). \quad (7)$$

После подстановки констант и толщин слоев для 14 часов работы расчет по формуле (4) дает значение максимальной плотности ионного тока $j_{\text{max}} = 0.523 \text{ А/м}^2$. График распределения плотности ионного тока представлен на рис. 10.

Расчеты

Расчетное исследование проводилось с целью подтверждения характера и скорости эрозии. Для расчета была использована программа IOS-3D, разработанная ГНЦ ФГУП “Центр Келдыша” [7]. Как показали предварительные расчеты, приведенные в [6], данная программа основана на хорошем модельном представлении процессов в об-

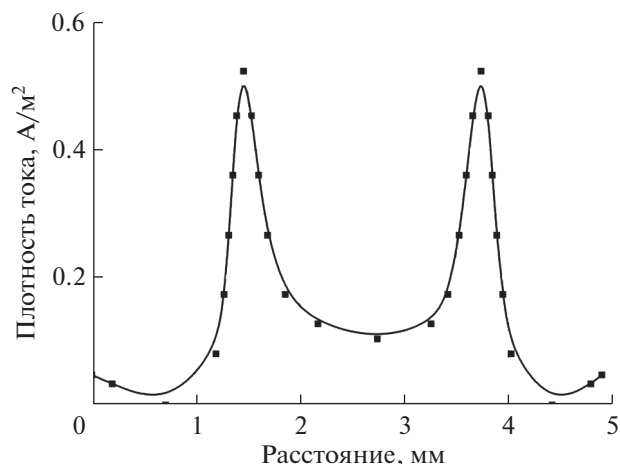


Рис. 10. График распределения плотности тока ионов перезарядки, полученный по результатам испытаний ВЧИД ММ.

ласти нейтрализации. По результатам расчетов построены пространственные диаграммы распределения скорости эрозии чистого материала Cu и Cr . Программа IOS-3D не предусматривает возможности моделирования эрозии поверхности УЭ при наличии какого-либо покрытия. В связи с этим для расчета скорости эрозии многослойного покрытия разработан программный блок [11], позволяющий на основании полученных данных о скоростях распыления отдельных компонентов покрытия, получить картину распыления нескольких слоев во времени. Комбинированный расчет многослойного материала с учетом постепенного перехода из слоя в слой позволяет получить зависимость максимальной глубины разрушения поверхности УЭ от времени и таким образом определить время активной работы ИОС. В ходе моделирования была получена зависимость максимальной глубины разрушения поверхности УЭ от времени работы двигателя. Экспериментальные и расчетные результаты представлены на рис. 11.

Из сравнения графиков можно сделать вывод о достаточно близкой (в пределах 3%) сходимости экспериментальных данных с расчетными, полученными при заданных начальных условиях: экспериментально полученное значение средней скорости эрозии составляет 0.32 мкм/ч , расчетное — 0.31 мкм/ч .

Также было проведено моделирование сквозного разрушения УЭ толщиной 1.5 мм , выполненного из титана, вдоль линии АВ (рис. 12).

Моделирование показало оценочное время сквозного распыления материала УЭ приблизительно 13800 ч . Результаты моделирования представлены на рис. 13.

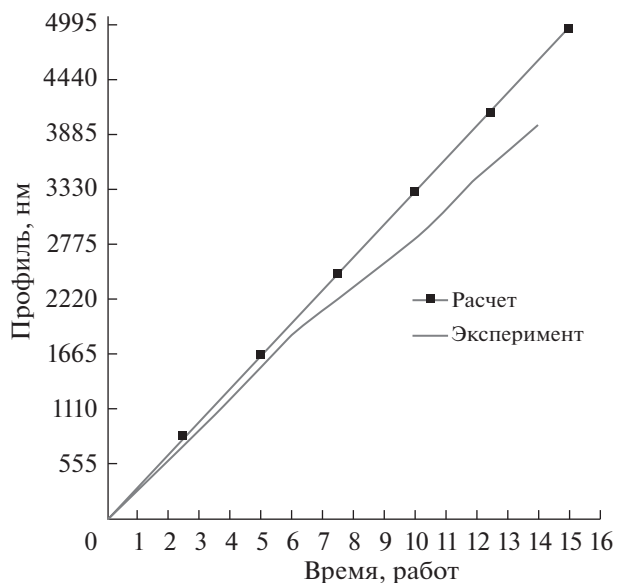


Рис. 11. Сравнение расчетной и экспериментальной зависимостей максимальной глубины разрушения поверхности УЭ от времени.

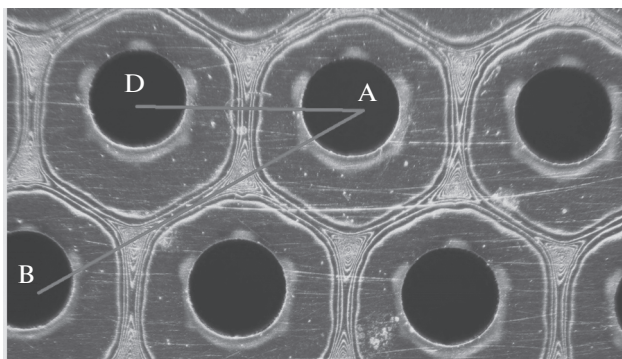


Рис. 12. Линия АВ, вдоль которой проводилось моделирование износа УЭ.

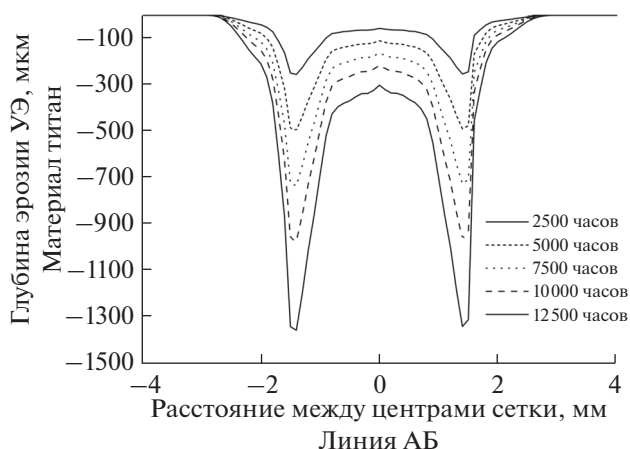


Рис. 13. Динамика изменения глубины эрозионной выработки для титанового УЭ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты подтвердили принципы создания методики расчетной оценки ресурсных характеристик ИД на базе укороченных испытаний с использованием многослойных контрастных покрытий. Методика базируется на экспериментальных результатах по скорости и характере износа УЭ, получаемых на протяжении начального этапа испытаний двигателя на ресурс. Экспериментальные исследования сопровождаются теоретическим расчетом на основании моделей износа, подтверждаемых в ходе проведения испытаний.

В обоснование продуктивности такого подхода были проведены 14-часовые исследовательские испытания по определению скорости эрозии УЭ в двухэлектродной ИОС в составе макета высокочастотного ионного двигателя малой мощности. По результатам испытаний с учетом полученной максимальной плотности тока ионного пучка был выполнен оценочный расчет скорости эрозии УЭ. Сходимость экспериментальных и расчетных данных находится в пределах 3%. Расчетом получена оценка ресурса двигателя ВЧИД ММ при потенциале минус 500 В: 13800 ч.

Полученный результат может быть использован для расчета ресурса при замене материала и потенциала УЭ в различных модификациях ВЧИД ММ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козубский К.Н., Корякин А.И., Мурашко В.М. // Электронный журнал "Труды МАИ". 2012. № 60. С. 12.
2. Payne W.F., Bens A.R., Basset D.A., Lovell R.R. Choice of an ion engine for the Communications Technology Satellite // AIAA Paper 72-491. 1972. P. 14.
3. Goebel D.M., Polk J.E., Sandler I., Mikellides I.G., Brophy J.R., Tighe W.G., Chien K.-R. Evaluation of 25-cm XIPS Thruster Life for Deep Space Mission Applications // In Proc. 31st Intern. Electric Propulsion Conf., University of Michigan, USA. IEPC-2009-152.
4. Абгарян В.К., Ахметжанов Р.В., Лёб Х.В., Обухов В.А., Черкасова М.В. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2013. № 11. С. 1.
5. Духопельников Д.В., Воробьев Е.В., Ивахненко С.Г., Ахметжанов Р.В., Обухов В.А., Хартов С.А. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2016 г. № 1. С. 15.
6. Ахметжанов Р.В., Воробьев Е.В., Духопельников Д.В., Ивахненко С.Г., Обухов В.А., Попов Г.А., Свотина В.В., Черкасова М.В. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2019 (в печати)
7. Koroteev A.S., Lovtsov A.S., Muravlev V.A., Selivanov M.Y., Shagayda A.A. Development of ion thruster IT-500 // Eur. Phys. J. D 71: 120. <https://doi.org/10.1140/epjd/e2017-70644-6>
8. Bundesmann C., Tartz M., Scholze F., Neumann H., Leiter H.J., Scortecci F., Feili D., Frigot P.-E., Gonzalez del Amo J. In-Situ Temperature, Grid Curvature, Erosion, Beam and Plasma Characterization of a Gridded Ion Thruster RIT-22 // In Proc. 31st Intern. Electric Propulsion Conf., University of Michigan, USA. IEPC-2009-160
9. Antropov N.N., Akhmetzhanov R.V., Bogaty A.V., Grishin R.A., Kozhevnikov V.V., Plokhikh A.P., Popov G.A., Khartov S.A. // Thermal Eng. 2016. V. 63. Is. 13. P. 957.
10. Loeb H.W. Principle of radio-frequency ion thrusters RIT // RIT-22 Demonstrator Test of Astrium ST at University of Giessen. 2010.
11. Akhmetzhanov R., Bogaty A., Cherkasova M., Dukhopel'nikov D., Ivakhnenko S., Kashirin D., Obukhov V., Popov G., Svatina V., Vorob'ev Y. Experimental and analytical study for the erosion of accelerating electrode of an ion thruster double-electrode ion-extraction system // The 6th Space Propulsion Conf. Seville, Spain. 2018. SP2018_00565.
12. Yonts O.C., Normand C.E., Harrison D.E. // J. Appl. Phys. 1960. V. 31. P. 447.

Calculation and Experimental Studies of Erosion of the Accelerating Electrode of a Two-Electrode Ion-Extraction System of a Radio-Frequency Ion Source

R. V. Akhmetzhanov, A. V. Bogaty, E. V. Vorob'ev, D. V. Dukhopel'nikov,
D. A. Kashirin, V. A. Obukhov, G. A. Popov, V. V. Svatina, M. V. Cherkasova

The article is devoted to computational and experimental studies of the erosion rate of the accelerating electrode of the ion thruster. When the ion beam propagates beyond the engine cut in its volume as a result of resonant charge-exchanging process, slow ions are formed, which, under the action of the negative electric potential of the accelerating electrode, bombard its surface, which faces the outgoing beam. Erosion of the accelerating electrode due to ion bombardment of charge exchange is the main factor limiting the life-time of an ion engine. A 25-layer coating consisting of optically contrasting layers of copper and chromium of sub-micron thickness pre-applied to the outer electrode surface was used for erosion rate diagnostics. The full exposure time was 14 hours. The erosion cavity profile was recorded every 3–5 hours and the dependence of the cavity deepness grow on time was found. The data obtained in the experiment were used as the initial data for 3D numerical simulation of multilayer coating erosion under the parameters corresponding to the experimental conditions. The results of the calculation and experiment coincide with an accuracy of about 3%. According to the results of the research, the lifetime of the investigated ion thruster was evaluated as 13 800 hours for Ti accelerating electrode at its potential minus 500 V.

Keywords: ion source, ion thruster, ion-extraction system, shortened lifetime tests, erosion, charge-exchange ions.