

УДК 629.78.018.3:533.6:621.396.67

А. Б. Надирадзе, В. В. Шапошников, В. А. Смирнов, И. А. Максимов, С. Г. Кочура

УЧЕТ ИНДИКАТРИСЫ РАСПЫЛЕНИЯ ПРИ ОЦЕНКАХ ЭРОЗИОННО-ЗАГРЯЗНЯЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ СТРУЙ ПЛАЗМЕННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

Рассмотрен подход повышения точности оценок эрозионно-загрязняющего воздействия плазмы стационарных плазменных двигателей (СПД) на элементы конструкции космических аппаратов (КА) посредством учета индикатрисы распыления материалов. Описан эксперимент по определению индикатрисы распыления одного из конструкционных материалов – ленты Л1-ПМ. Представлены результаты сравнительного анализа расчетных уровней загрязнения радиатора системы терморегулирования (СТР) перспективной унифицированной спутниковой платформы «Экспресс-1000» с учетом и без учета индикатрисы распыления.

Ключевые слова: космический аппарат, стационарный плазменный двигатель, эрозия, загрязнение, деградация оптических коэффициентов, индикатриса распыления.

Оценка эрозионно-загрязняющего воздействия плазмы СПД на функциональные поверхности космических аппаратов (КА), и разработка, при необходимости, мероприятий по парированию их дестабилизирующего воздействия являются необходимыми требованиями к разработке и проектированию современных телекоммуникационных и других спутников со сроками активного существования, достигающими 15 лет.

Вследствие загрязнения продуктами эрозии могут измениться оптические коэффициенты загрязняемых поверхностей, в частности коэффициенты поглощения и излучения терморегулирующих покрытий (ТРП) радиаторов СТР. Снижение эксплуатационных характеристик СТР при превышении некоторого критического уровня загрязнения может привести к сбоям и отказам в функционировании подсистем КА, к которым предъявляются требования по обеспечению теплового режима.

В связи с возрастающими требованиями к целевым характеристикам и энерговооруженности КА и при наличии ограничений на увеличение массово-габаритных характеристик конструктивно-компоновочные схемы современных КА существенно «уплотняются». В результате возрастает эрозионное воздействие струй СПД на элементы конструкции КА и, как следствие, загрязнение критических поверхностей КА продуктами эрозии. При этом, критичной поверхностью, наиболее загрязняемой продуктами эрозии, является ТРП радиаторов СТР.

Результаты расчетов значений поверхностной плотности пленок, образованных ввиду распыления струей СПД элементов конструкции КА, показывают, что уровень загрязнения продуктами распыления может достигать предельных величин. При этом, для парирования загрязняющего воздействия продуктов эрозии приходится увеличивать площадь ТРП. Так для парирования деградации коэффициента поглощения $\Delta A_s = 0,01$, требуется увеличение площади ТРП приблизительно на $0,5 \text{ м}^2$, что влечет за собой существенное увеличение массы и габаритов КА.

Чтобы исключить возможность получения сильно завышенных значений требуемой площади ТРП необходимо учесть все основные факторы, влияющие на эрозионно-загрязняющее воздействие плазмы СПД, и максимально увеличить точность прогнозирования.

Одним из путей повышения точности прогнозирования является учет индикатрисы распыления материалов поверхностей КА, попадающих в плазменные струи СПД.

В простейшем случае для задания индикатрисы распыления используют модель Ламберта с переменной по углу интенсивностью:

$$nv(R, \theta) = \frac{J_m}{2\pi R^2} \cos(\theta). \quad (1)$$

где J_m – интенсивность источника; R – расстояние от источника; θ – угол выхода частицы.

Однако точность такой аппроксимации, особенно при скользких углах падения ионов, невелика, т. к. при скользких углах падения (которые обычно реализуются при воздействии струй СПД на элементы конструкции КА) форма индикатрисы распыления существенно отличается от косинусной. Причем потоки, направленные на КА, оказываются существенно меньше, чем при использовании модели (1). В связи с этим, использование более точных моделей для описания индикатрисы распыления позволит существенно снизить расчетные величины потоков осаждения по сравнению с моделью косинуса.

Для аппроксимации индикатрисы распыления в настоящее время наиболее целесообразным является использование хорошо себя зарекомендовавшего соотношения Занга (Zhang) [1], позволяющего рассчитать потоки распыленных частиц в различных направлениях. Данное соотношение имеет вид

$$y = \frac{Y}{1 - \sqrt{\frac{E_*}{E}} \cos(\theta)} \cdot \frac{\cos(\psi)}{\pi} \times \left[1 - \frac{1}{4} \sqrt{\frac{E_*}{E}} \left(\cos(\theta) \gamma(\psi) + \frac{3}{2} \pi \sin(\theta) \sin(\psi) \cos(\varphi) \right) \right], \quad (2)$$

где $\gamma(\psi) = \frac{3 \sin^2(\psi) - 1}{\sin^2(\psi)} + \frac{\cos^2(\psi) \cdot (3 \sin^2(\psi) + 1)}{2 \sin^3(\psi)} \ln \left(\frac{1 + \sin(\psi)}{1 - \sin(\psi)} \right)$;

y – масса распыленного вещества с учетом индикатрисы; Y – полная масса распыленного вещества; θ – угол падения ионов по отношению к нормали; ψ – азимутальный угол вылета частиц распыления; φ – полярный угол вылета частиц распыления; E – энергия ионов; E_* – пороговая энергия распыления.

Преимущество этой формулы заключается в том, что индикатриса задается всего одним параметром $\varepsilon = E_* / E$, который можно определить экспериментально (рис. 1).

В струю двигателя СПД М50 под некоторым углом θ были помещены образцы исследуемого материала (полиимидной ленты Л1-ПМ): образцы 1 и 2. Образцы 1 использовались для определения коэффициента распыления материала весовым методом, образцы 2 – для определения индикатрисы распыления.

Для определения индикатрисы распыления использовался фотометрический метод, основанный на измерении коэффициента пропускания тонких пленок, образованных осажденным веществом. Для сбора распыленного вещества напротив исследуемых образцов в плоскости падения ионов и в перпендикулярной ей плоскости были расположены стеклянные пластинки. Исследуемые образцы и стеклянные пластинки помещались в специальный защитный кожух для исключения попадания на них продуктов распыления вакуумной камеры.

Измерение прозрачности пластинок осуществлялось до и после эксперимента с помощью спектрофотометра в 6 точках по длине стеклянной пластинки. Абсолютное значение осажденной массы измерялось с помощью кварцевых микровесов, установленных напротив исследуемого образца. Величина коэффициента пропускания вычисляется по формуле

$$T_{c,k} = \frac{T_k}{T_0}, \quad (3)$$

где T_0 – коэффициент пропускания чистого образца стекла; T_k – коэффициент пропускания образца стекла с осажденной на него пленкой в точке k .

Коэффициенты пропускания стеклянных образцов, вычисленные по формуле (3) для длины волны 425 нм, приведены на рис. 2.

Согласно закону Бугера-Ламберта, ослабление света в пленке зависит от ее толщины следующим образом:

$$T_{c,k} = \exp(-\beta \cdot h) \text{ или } T_{c,k} = \exp(-\beta \cdot m/\rho), \quad (4)$$

где β – коэффициент ослабления, учитывающий процессы рассеяния и поглощения света в пленке; h – толщина загрязняющей пленки; m – поверхностная плотность пленки (г/см^2); ρ – плотность пленки загрязнения.

При известной величине коэффициента пропускания и толщине пленки коэффициент ослабления β можно вычислить по формуле

$$\beta = \frac{1}{h} \ln(T_{c,k}). \quad (5)$$

Значение коэффициента ослабления β , найденное по формуле (5), составило $1,1 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$.

Величина коэффициента ослабления β довольно велика, что говорит о наличии в пленке большого количества центров поглощения. Принимая во внимание, что конденсирующимися продуктами распыления полиимидной ленты Л1-ПМ является, в основном, углерод, полученное значение удовлетворительно согласуется с данными работы [2].

Полагая, что величина коэффициента β является константой, была вычислена масса осажденной пленки во всех точках стеклянных пластинок по формуле

$$m_{c,k} = \frac{\rho}{\beta} \ln(T_{c,k}). \quad (6)$$

Для определения параметра индикатрисы распыления ε была решена следующая оптимизационная задача:

$$(M_0, \varepsilon) = \arg \min \{ \Omega \}; \quad \Omega = \sum_k (\hat{m}_{c,k} - \tilde{m}_{c,k})^2, \quad (7)$$

где $\hat{m}_{c,k}$ – экспериментально определенное значение массы осажденного вещества; $\tilde{m}_{c,k}$ – расчетное значение массы осажденного вещества, которое, согласно выражению (2), вычисляется по формуле

$$m_{c,k} = \frac{M_0}{2\pi r_k^2} \cdot \text{Ind}(\varphi, \psi, \varepsilon), \quad (8)$$

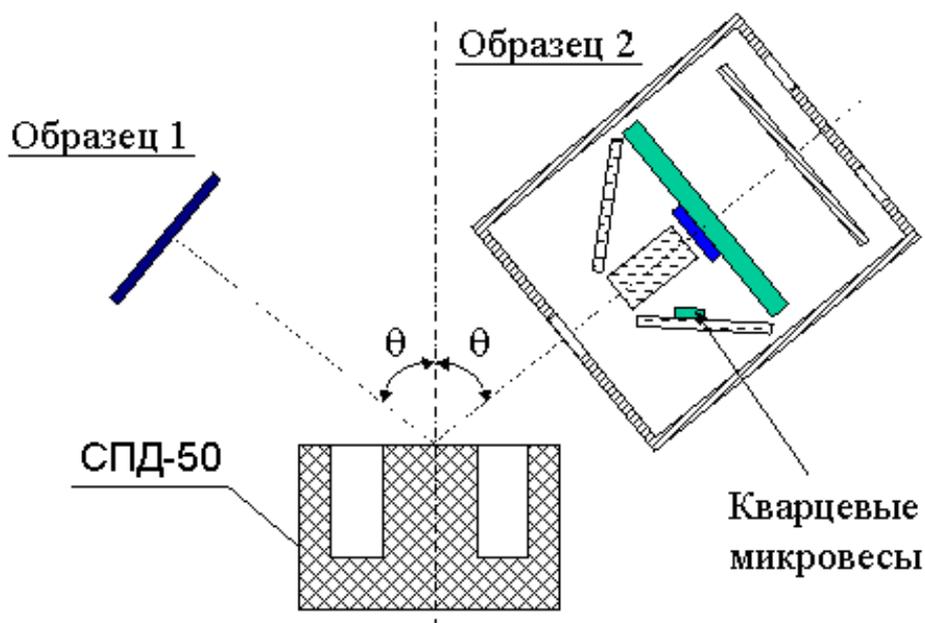


Рис. 1. Схема эксперимента по определению коэффициента и индикатрисы распыления

где M_0 – полная масса распыленного вещества; r_k – расстояние от центра области распыления до точки на стеклянной пластинке.

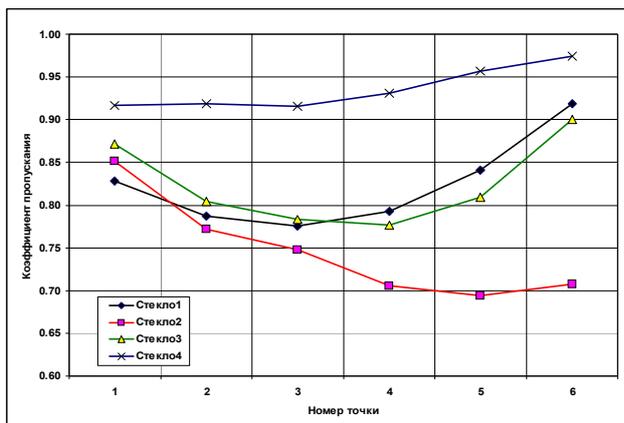


Рис. 2. Коэффициенты пропускания в различных точках стеклянных образцов

В результате решения оптимизационной задачи (7) было получено значение параметра индикатрисы распыления ϵ , равное 0,4. При этом пороговая энергия распыления для полиимидной ленты Л1-ПМ принималась равной 30 эВ. Формы индикатрисы распыления, определяемой полученным параметром ϵ , представлены на рис. 3.

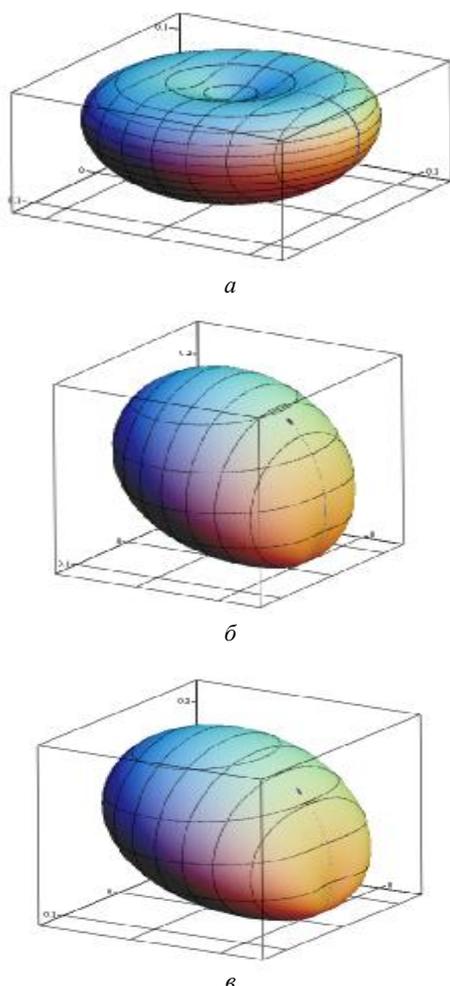


Рис. 3. Формы индикатрисы распыления для различных углов падения ионов: *а* – 0°; *б* – 45°; *в* – 60°

В диапазоне углов 0...60° индикатриса распыления имеет существенный наклон, что в значительной мере влияет на расчетное значение уровня загрязнения продуктами распыления (см. рис. 3). При дальнейшем увеличении угла падения ионов форма индикатрисы меняется незначительно [3].

Результаты расчетов уровней загрязнения ТРП радиатора СТР перспективной унифицированной спутниковой платформы «Экспресс-1000» разработки ОАО «Информационные спутниковые системы», продукты распыления элементов конструкции панелей батарей солнечных, экранированных в целях снижения величин эрозии полиимидной лентой Л1-ПМ, без учета и с учетом индикатрисы распыления представлены на рис. 4. Расчеты проведены с использованием программного комплекса TurboDESIGN 7,0 (разработанного в МАИ), результаты описанного выше эксперимента которого интегрированы в модельно-математический аппарат.

Анализ результатов расчетов показывает, что учет индикатрисы распыления позволяет снизить расчетное значение среднеинтегрального уровня загрязнения в 2 раза – с $5,5 \cdot 10^{-6}$ г/см² (без учета индикатрисы распыления) до $2,7 \cdot 10^{-6}$ г/см² (с учетом индикатрисы распыления). Причем, снижение уровня загрязнения ТРП радиатора СТР продуктами распыления отдельных элементов конструкции панелей солнечных батарей достигает 4,7 раз.

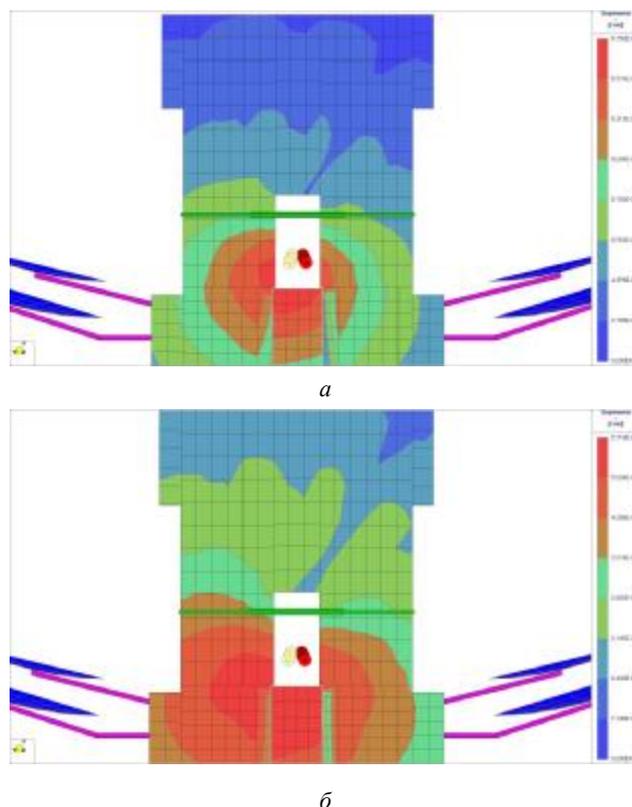


Рис. 4. Результаты расчетов уровней загрязнения радиатора СТР продуктами распыления элементов конструкции панелей солнечных батарей: *а* – без учета индикатрисы распыления; *б* – с учетом индикатрисы распыления

При разработке подхода повышения точности оценок эрозионно-загрязняющего воздействия плазмы СПД посредством учета индикатрисы распыления получены

следующие результаты, обладающие признаками новизны:

– разработана методика экспериментального определения индикатрисы распыления материалов и покрытий КА;

– осуществлена подготовка экспериментальной базы и проведены эксперименты по определению индикатрисы распыления полиимидной лентой Л1-ПМ;

– проведен анализ полученных экспериментальных данных, с использованием функции Занга получено значение параметра индикатрисы распыления ε для полиимидной ленты Л1-ПМ, равное 0,4 (для энергии ионов 200 эВ);

– проведены расчеты уровней загрязнения радиатора СТР перспективной унифицированной спутниковой платформы «Экспресс-1000» продуктами распыления, подтвердившими, что учет индикатрисы распыления существенно снижает расчетные уровни загрязнения.

Таким образом, учет индикатрисы распыления материалов поверхностей КА, попадающих в плазменные струи СПД, является эффективным способом повыше-

ния точности оценок эрозионно-загрязняющего воздействия плазмы СПД, который позволяет предотвратить неоправданное увеличение массы и габаритов КА.

Библиографические ссылки

1. Differential Sputter Yields Of Boron Nitride, Quartz, and Kapton Due to Low Energy Xe+ Bombardment / P. Yalin, B. Rubin, S. R. Domingue, Z. Glueckert, J. D. Williams. AIAA 2007-5314, 43th AIAA Joint Propulsion Conference and Exhibit, Cincinnati, OH. 8–11 July 2007.

2. Надирадзе А. Б., Паршина Е. Б. Определение изменения свойств оптических покрытий космических аппаратов в результате их загрязнения. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2006. № 10. С. 25–32.

3. Проблемы прикладной физики. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. Физическое распыление одноэлементных твердых тел / под ред. Р. Бериша. М., 1984.

A. B. Nadiradze, V. V. Shaposhnikov, V. A. Smirnov, I. A. Maximov, S. G. Kochura

INDICATRIX ACCOUNT OF MATERIALS DISPERSION AT THE ESTIMATIONS OF EROSION-CONTAMINATING INFLUENCE OF STREAMS OF PLASMA THRUSTERS ON SPACE CRAFT

The approach of the estimation accuracy increase of the erosion-contaminative plasma influence of the stationary plasma thrusters (SPT) on the space craft structure elements by means of recordkeeping of indicatrix of materials dispersion is investigated in the report. The experiment on the dispersion indicatrix rating of one of the constructional material – Л1-ПМ ribbon is described in the article. The results of the comparative analyses of the radiator contamination predicted levels of the Thermal Control System (TCS) of the perspective unified «Express-1000» satellite platform with account and without account of the indicatrix of dispersion are presented in the report.

Keywords: space craft, stationary plasma thruster, erosion, contamination, degradation of the optical coefficient, indicatrix of dispersion.

© Надирадзе А. Б., Шапошников В. В., Смирнов В. А., Максимов И. А., Кочура С. Г., 2010