

УДК 621.382

Оценка деструктивного влияния метеороидов и частиц космического мусора на оптическую систему космического аппарата

Барсуков К.Б., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Радиоэлектронные системы и устройства»*

*Научный руководитель: Славинский М.К., старший преподаватель
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Радиоэлектронные системы и устройства»*

RL1@bmstu.ru

В данной статье рассматривается деструктивное влияние метеороидов и частиц космического мусора на элементы оптических систем (ОС) космического аппарата (КА), и предлагается методика оценки данного влияния с использованием существующих математических моделей оценки кратеров от столкновения с различными частицами, моделей распределения метеороидов и частиц космического мусора.

В оптических системах КА используется зеркальные схемы, поэтому основным элементом, подверженным влиянию деструктивных факторов, будем считать зеркало. В качестве типового зеркала будет рассматриваться следующая конструкция: слой алюминия с защитным слоем из кристаллического кварца (SiO_2) на подложке из ситалла. В данной модели типового зеркала непосредственно отражающее покрытие представляет собой тонкий слой алюминия. Следовательно, можно предположить два исхода от столкновения единичной частицы с зеркальной поверхностью – частица пробивает слой или не пробивает слой, не изменяя формы его поверхности. При этом в месте пробоя зеркало полностью теряет отражательные свойства. В таком случае можно считать, что деградация оптических свойств определяется отношением суммарной площади разрушений к площади зеркала.

Результат столкновения оценивают в предельной толщине материала, глубине кратера P_C , диаметре кратера D_C или дыры (если пластина пробивается полностью).

В [1] на основе анализа экспериментальных результатов приводится формула для оценки диаметра кратера D_C :

$$D_C = 0,54 \cdot d_p \cdot \left(\frac{\rho_p}{\rho_t} \right)^{2/3} \cdot \left(\sqrt{\frac{6,895 \cdot \rho_t}{Y_t}} \cdot v \cdot \cos(\theta) \right)^{2/3}, \quad (1)$$

где

d_p – диаметр частицы, см;

ρ_p – плотность частицы, гр/см³;

ρ_t – плотность материала пластины, гр/см³;

Y_t – предел текучести материала пластины, в [1] измеряется в lb·10³/inch, для перевода в МПа делится на 6,895;

v – скорость столкновения, км/с;

θ – угол столкновения, отмеряемый от нормали.

Для оценки диаметра кратера D_C , см, часто используют [2] следующую формулу:

$$D_C = 10,5 \cdot d_p^{19/18} \cdot BH^{-0,25} \cdot \left(\frac{\rho_p}{\rho_t} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{v \cdot \cos(\theta)}{v_{ct}} \right)^{2/3}, \quad (2)$$

где

BH_t – твердость по Бринеллю материала пластины;

v_{ct} – скорость звука в материале пластины, км/с.

В [3] предложена более сложная модель разрушения стеклянной поверхности, показанная на рисунке 1. Согласно этой модели результат разрушения состоит из двух зон: собственно кратер, характеризующийся глубиной P_C и диаметром D_C , и зона скола, описываемая собственной глубиной P_S и собственным диаметром D_S .

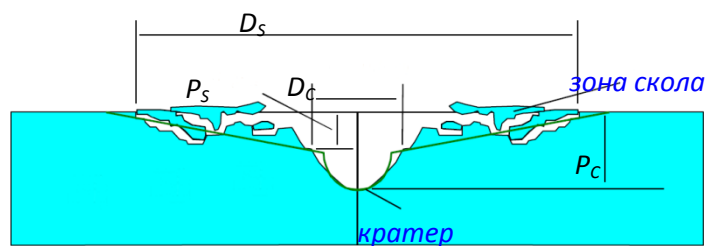


Рис. 1. Модель геометрии разрушения поверхности из кварцевого стекла

В [3] приводятся формулы для расчета параметров разрушения различного типа стеклянных пластинок, которые достаточно точно описывают экспериментальные результаты. Так для оценки диаметра кратера на поверхности fused silica предлагается использовать следующую формулу:

$$D_C = 1,99 \cdot \rho_p^{-0,18} \cdot E_p^{0,356} = 1,99 \cdot \rho_p^{-0,18} \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_p^3 \cdot \rho_p \cdot v^2}{12} \cdot 10^{10} \right)^{0,356}, \quad (3)$$

где E_p – кинетическая энергия частицы.

Для оценки диаметра зоны скола предлагается использовать следующую формулу:

$$D_S = 4,55 \cdot d_p \cdot \rho_p^{-0,5} \cdot E_p^{0,1} = 4,55 \cdot d_p \cdot \rho_p^{-0,5} \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_p^3 \cdot \rho_p \cdot v^2}{12} \cdot 10^{10} \right)^{0,1}. \quad (4)$$

Для оценки глубины кратера предлагается использовать следующую формулу:

$$P_C = K \cdot d_p^{1,2} \cdot \rho_p^{0,5} \cdot (v \cdot \cos(\theta))^{0,67}, \quad (5)$$

где K – коэффициент, принимающий для различного вида стекла следующие значения: 0,66 для fused silica; 0,86 для Vicos; 0,523 для Pyrex.

Сравнительный анализ результатов расчета показывает, что: диаметр кратера D_C , рассчитанный по формуле (3) принимает среднее значение между аналогами, рассчитанными по формулам (1) и (2).

Исходя из вышесказанного, можно предложить использовать для оценки параметров разрушения типового зеркала формулы (3)–(5). При этом считая, что глубина области скола:

$$P_S = P_C \cdot 0,55. \quad (6)$$

Площадь разрушения зеркального слоя от единичного столкновения S_p будем оценивать по следующей формуле:

$$S_p = \frac{\pi \cdot D_p^2}{4}, \quad D_p = \begin{cases} 0 & , \text{если } P_c < t_{\kappa\sigma} \\ D_S & , \text{если } P_c \cdot 0,55 \geq (t_{\kappa\sigma} + t_{\text{зер}}) \\ D_C & , \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (7)$$

где

D_p – диаметр разрушения;

$t_{\kappa\sigma}$ – толщина защитного слоя;

$t_{\text{зер}}$ – толщина зеркального слоя.

В работе [5] сравниваются различные модели распределения метеороидов. Показано, что разные модели дают близкие распределения. Поэтому для дальнейших исследований выберем наиболее простой способ – модель Грюна [4]. Согласно этой

модели функция распределения, определяющая число столкновений с площадкой площадью 1 м^2 частиц массой m и менее за год, задается следующей формулой:

$$F_m(m) = c_0 \cdot \left((c_1 \cdot m^{0,306} + c_2) \right)^{-4,38} + c_3 \cdot \left(m + c_4 \cdot m^2 + c_5 \cdot m^4 \right)^{-0,36} + c_6 \cdot \left(m + c_7 \cdot m^2 \right)^{-0,8} \quad (8)$$

где константы $c_0 - c_7$ принимают значения

$$c_0 = 3,156 \cdot 10^7; c_1 = 2,2 \cdot 10^3; c_2 = 15; c_3 = 1,3 \cdot 10^{-9}; c_4 = 1,0 \cdot 10^{11}; c_5 = 1,0 \cdot 10^{27}; c_6 = 1,3 \cdot 10^{-16}; c_7 = 1,0 \cdot 10^6.$$

Модель Грюна применима для частиц массой от 10^{-18} до 10^2 грамм и не учитывает гравитационных эффектов Земли и Луны. В этой модели предполагаются усредненные для всех частиц плотности ($\rho_m = 0,5 \text{ г/см}^3$) и скорости ($v_m = 20,0 \text{ км/с}$). Поскольку плотность частиц принимается постоянной вне зависимости от размера, диаметр частицы также определяется простым соотношением в зависимости от массы, предполагая, что частицы имеют форму шара:

$$d = 2 \cdot \left(\frac{3}{4\pi} \cdot \frac{m}{\rho} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (9)$$

Соответственно соотношение, связывающее массу частицы с ее диаметром, будет выглядеть следующим образом:

$$m = \frac{\pi \cdot \rho \cdot d^3}{6}. \quad (10)$$

Наиболее простой моделью распределения частиц космического мусора является модель NASA 90, представляющая собой набор несложных формул. Исходя из данных сравнительного анализа моделей потоков частиц космического мусора [6], расхождение моделей от реальных данных в разы превышает расхождение моделей между собой. Поэтому использование простой модели NASA 90 не сильно портит и без того не очень точные модельные представления о потоке космического мусора.

В соответствии с моделью NASA 90 число частиц диаметра d и меньше, которое попадает на площадку 1 м^2 космического аппарата, находящегося на орбите с высотой h км ($h \leq 1000$ км) и наклоном i град можно оценить по следующей формуле:

$$F_d(d, h, i, t, S) = \sqrt{10^{H(d)}} \cdot \Phi(h, S) \cdot \Psi(i) \cdot (F_1(d) \cdot g_1(t) + F_2(d) \cdot g_2(t)), \quad (11)$$

$$H(d) = \exp\left(-\frac{(\log_{10} d - 0,78)^2}{0,406}\right),$$

$$\Phi(h, S) = \Phi_1(h, S) \cdot (1 + \Phi_1(h, S))^{-1}, \quad \Phi_1(h, S) = 10^{\frac{h}{200} - \frac{S}{140} - 1,5},$$

$$F_1(d) = 1,22 \cdot 10^{-5} \cdot d^{-2,5}, \quad g_1(t, q) = (1 + q)^{t-1988},$$

$$F_2(d) = 8,1 \cdot 10^{10} \cdot (d + 700)^{-6}, \quad g_2(t, q) = 1 + p \cdot (t - 1988),$$

где

i – наклонение орбиты;

t – год, для которого производится подсчет потока частиц;

S – среднегодовой поток излучения солнца на длине волны 10,7 см. за год, предыдущий от t (в последние годы значение S лежит в диапазоне от 70 до 150);

ψ – параметр, зависящий от наклона орбиты (таблица 1).

Таблица 1

Значения параметра ψ

i , град	28,5	30	40	50	60	70	80	90	100	120
$\psi(i)$	0,91	0,92	0,96	1,02	1,09	1,26	1,71	1,37	1,78	1,18

В количественном выражении предлагаем для учета влияния метеороидов и частиц орбитального мусора ввести коэффициент деградации зеркальной поверхности и рассчитывать его по следующей формуле:

$$k_{m\&d} = \frac{S_m + S_d}{S_m}, \quad (12)$$

где

S_m – площади разрушений одного квадратного метра поверхности зеркала от метеороидов, м^2 ;

S_d – площади разрушений одного квадратного метра поверхности зеркала от частиц орбитального мусора, м^2 ;

S_m – площадь первого зеркала ОС, м^2 .

Площадь разрушений одного квадратного метра поверхности зеркала от метеороидов можно оценить по следующей формуле:

$$S_m = \sum_{d_i=d_{mn}, \dots, d_{mx}} S_p(d_i) \cdot (F_m(d_i) - F_m(d_{i+1})), \quad (13)$$

где

$S_p(d_i)$ – оцениваемая по соотношению (7) площадь разрушения зеркального слоя от единичного столкновения метеороидом диаметра d_i , с учетом принятой в модели Грюна плотности и скорости метеороидов, м²;

F_m – задаваемая соотношением (8) функция распределения метеороидов, с учетом правила пересчета массы частички в ее диаметр (9).

Площадь разрушений одного квадратного метра поверхности зеркала от частиц орбитального мусора можно оценить по следующему соотношению:

$$S_d = \sum_{d_i=d_{mn}, \dots, d_{mx}} S_p(d_i) \cdot (F_d(d_i) - F_d(d_{i+1})), \quad (14)$$

где

$S_p(d_i)$ – оцениваемая по соотношению (7) площадь разрушения зеркального слоя от единичного столкновения с частицей мусора диаметром d_i , с учетом принятой в модели NASA-90 плотности и средней скорости частиц мусора, м²;

F_d – задаваемая соотношением (11) функция распределения частиц орбитального мусора.

На рисунке 2 представлена функция величины площадей разрушений S_m и S_d одного квадратного метра зеркальной поверхности в год от метеороидов и частиц орбитального мусора соответственно в зависимости от значения d_{mn} . При этом значение d_{mx} было фиксированным и равнялось 10^{-2} м. Левая часть графиков стабилизирована и определяет итоговые оценки S_m и S_d .

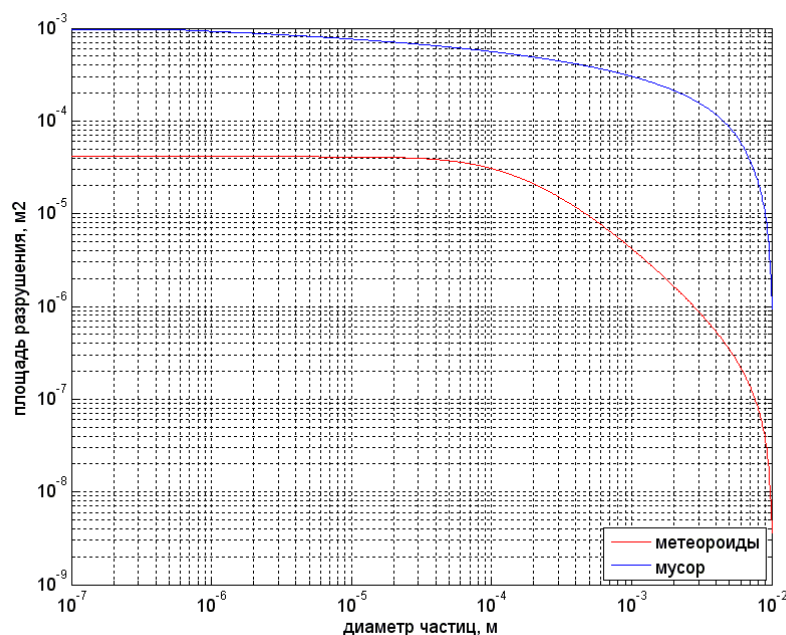


Рис. 2. Кумулятивная функция площади разрушения от потока метеороидов (модель Грюна) и частиц орбитального мусора (модель NASA-90)

диаметром менее заданного, приходящихся на площадку площадью 1 м^2 за год для круговой орбиты высотой 1600 км с наклоном 60 градусов

В таблице 2 представлены оценки деструктивного влияния метеороидов и частиц космического орбитального мусора на входную оптику космического аппарата с диаметром входной апертуры 0.5 м, находящегося в течении одного года на круговой орбите высотой 1600 км с наклоном от 0 до 120 градусов.

Данные таблицы 2 позволяют сделать следующий вывод: деструктивное влияние метеороидов и частиц космического орбитального мусора на входную оптику минимально и составляет величину порядка половины процента.

Таблица 2

Площадь разрушения и коэффициент деградации поверхности зеркала КА на круговой орбите высотой 1600 км за год

	Наклонение орбиты, градусы				
	0	30	60	90	120
Площадь разрушения 1 м^2 поверхности зеркала от метеороидов $S_m, \text{ м}^2$	$4,121 \cdot 10^{-5}$	$4,121 \cdot 10^{-5}$	$4,121 \cdot 10^{-5}$	$4,121 \cdot 10^{-5}$	$4,121 \cdot 10^{-5}$
Площадь разрушения 1 м^2	$7,738 \cdot 10^{-4}$	$7,799 \cdot 10^{-4}$	$9,566 \cdot 10^{-4}$	$1,292 \cdot 10^{-3}$	$1,079 \cdot 10^{-3}$

поверхности зеркала от частиц орбитального мусора $S_d, \text{м}^2$					
Общая площадь разрушения 1м^2 поверхности зеркала, м^2	$8,151 \cdot 10^{-4}$	$8,211 \cdot 10^{-4}$	$9,978 \cdot 10^{-4}$	$1,334 \cdot 10^{-3}$	$1,120 \cdot 10^{-3}$
Коэффициент деградации поверхности зеркала $k_{m\&d}$	0,0039	0,0040	0,0051	0,0068	0,0057

Список литературы

1. Love S.G. Morphology of meteoroid and debris impact craters formed in soft metal targets on the LDEF satellite // Int. J. of Impact Engineering. 1995. № 16. № 3. P.405–418.
2. Gäde A., Miller A. ESABASE2/Debris Release 6.0. Technical Description. Режим доступа: <http://esabase2.net/wp-content/uploads/2013/07/ESABASE2-Debris-Technical-Description.pdf> (дата обращения 20.02.2015).
3. Shanbing Y. Experimental laws of cratering for hypervelocity impacts of spherical projectiles into thick target // Int. J. of Impact Engineering. 1994. № 1. P. 67–77.
4. Grun E., Zook H.A., Fechtig H., Giese R.H. Collisional balance of the meteoritic complex // ICARUS 1985. № 2. P. 244-272.
5. Drolshagen G. Comparison of meteoroid models. IADC Action Item 24.1. Режим доступа: http://www.iadc-online.org/Documents/IADC-09-03_AI_n24_1_final1.pdf (дата обращения 13.02.2015).
6. Fucushige S. Comparison of Debris Environment Models: ORDEM2000, MASTER2001 and MASTER2005 // IHI Eng. Review. 2007. № 1. P. 31–41.
7. Поздняков А. Ю. Предварительное обоснование технического облика оптической системы целевой аппаратуры для КА в составе космического сегмента СККП // Молодежный научно-технический вестник. Электрон. журн. 2013. № 11. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/636104.html> (дата обращения 25.03.2015).