

ДЕГРАДАЦИЯ ОПТИЧЕСКОГО СТЕКЛА В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ МИКРОМЕТЕОРИТОВ И ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

© 2011 г. Н. Д. Сёмкин, М. П. Калаев

Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королёва

Россия, 443086, Самара, Московское ш., 34

E-mail: semkin@ssau.ru

Поступила в редакцию 08.07.2010 г.

Исследуется изменение спектрального коэффициента пропускания оптического стекла под воздействием потока высокоскоростных пылевых частиц. Рассмотрено влияние размеров и скорости частиц на характеристики оптических дефектов, проведено сравнение теоретических результатов с экспериментальными данными, полученными в экспериментах с использованием электродинамического ускорителя микрочастиц.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при оценке сроков функционирования космических аппаратов (к.а.) необходимо учитывать процессы, связанные с взаимодействием элементов конструкций к.а. и продуктов антропогенного загрязнения космоса. Источниками загрязнения являются выхлопы ракет, неотработанное топливо, обломки к.а. При лабораторном моделировании эффектов антропогенного загрязнения околоземного космического пространства необходимо иметь широкий набор микрочастиц и элементов к.а.

При длительной эксплуатации к.а. открытые элементы его конструкции постепенно изменяют свои характеристики. Зная усредненный поток частиц, попадающих на поверхность к.а., можно в лабораторных условиях моделировать потоки, соответствующие различным условиям его полета.

По имеющимся сведениям [1], наиболее распространенными являются повреждения поверхности конструкционных материалов в виде кратеров. Форма и размеры дефектов зависят от размеров, скорости частиц и физических свойств материалов частиц и мишени. Для расчета глубин и диаметров кратеров существуют известные эмпирические соотношения [2], однако при воздействии потока микрометеоритов на оптические элементы реальная площадь повреждения поверхности может существенно превышать расчетную, поскольку в результате удара происходит растрескивание околократерной зоны. Поэтому результирующая площадь повреждения S_{Π} определяется выражением

$$S_{\Pi} = \frac{\pi}{4}(kd_k)^2, \quad (1)$$

где d_k — диаметр кратера; k — коэффициент, учитывающий повреждение околократерной зоны, оценочно принимается равным 2–3 [1]. Значение k зависит от множества факторов, поэтому целесообразно определить его для конкретного типа стекла экспериментальным путем.

ВОЗДЕЙСТВИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ ЧАСТИЦ НА КВАРЦЕВОЕ СТЕКЛО С НАНЕСЕННОЙ ПЛАТИНОВОЙ ПЛЕНКОЙ

Источником частиц служил линейный ускоритель для моделирования микрометеоритов [3]. В качестве объекта исследования использовали оптическое стекло К-8, на поверхность которого нанесена пленка из платины толщиной 0.2 мкм. Объект подвергали воздействию потока из 14000 частиц алюминия (рис. 1) с известным законом

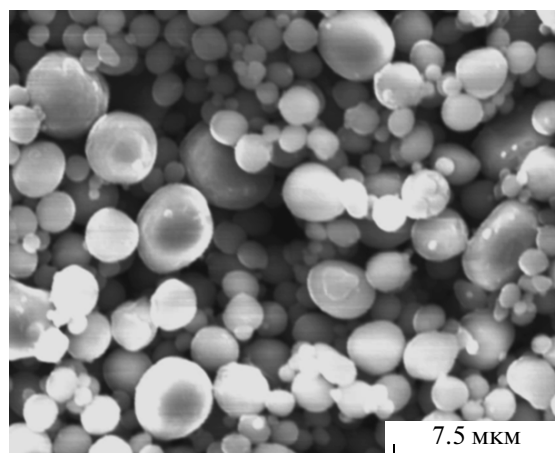


Рис. 1. Фотография частиц алюминия.

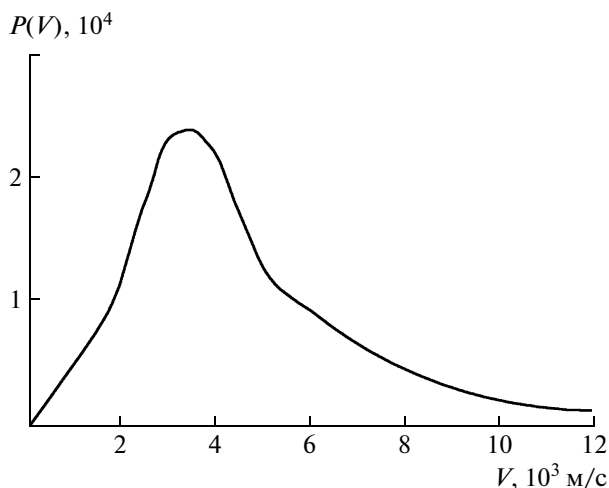


Рис. 2. Распределение потока частиц по скоростям.

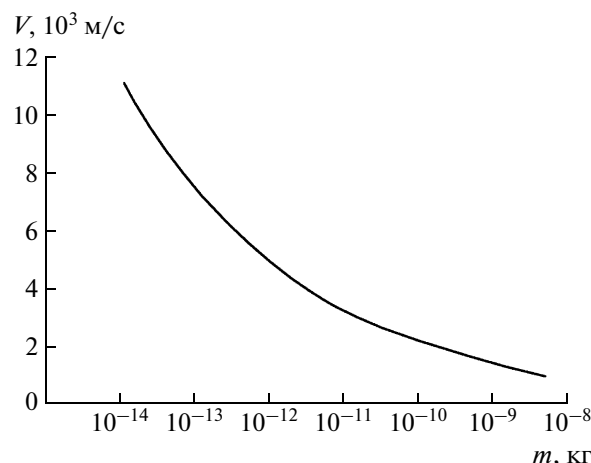


Рис. 3. Зависимость скорости частицы от массы.

распределения по скоростям (рис. 2). Скорость и масса частиц в данном эксперименте связаны зависимостью, показанной на рис. 3.

На рис. 4а приведена фотография кратера от удара низкоскоростной частицы (2.5 км/с), на рис. 4б — спектр, соответствующий элементному составу на поверхности.

Как следует из рис. 4а, частица имела недостаточную скорость, чтобы полностью испариться при ударе о поверхность кварцевого стекла. Частично материал частицы (в данном случае алюминий) находился в кратере и рядом с ним. Нахождение в зоне кратера алюминия подтверждает рис. 4б.

Размер образовавшегося кратера в несколько раз превышает размер частицы и зависит от скорости частицы при ударе. Наиболее вероятная скорость частиц в эксперименте составляла 5.5 км/с. Исходя из размера кратера, можно заключить, что размер частицы для кратера на рис. 4а составлял ~1 мкм.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ПРОПУСКАНИЯ СТЕКЛА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОТОКА МИКРОМЕТЕОРИТОВ

Для оценки степени повреждения поверхности потоком микрометеоритов необходимо знать количество попаданий в исследуемый участок образца, а также законы распределения частиц по массам и скоростям. Эксперименты показывают, что плотность потока микрочастиц максимальна вблизи продольной оси симметрии ускорительного тракта и подчиняется закону, показанному на рис. 5. Такая зависимость близка к нормальному закону распределения. С учетом этого определим количество частиц в малом круге диаметром,

равным диаметру зондирующего луча спектрофотометра:

$$N_r = 2\pi \int_0^{d/2} xP(x)^2 dx, \tag{2}$$

где $P(x) = (\sigma\sqrt{2\pi})^{-1} \exp(-x^2/2\sigma^2)$.

Поскольку диаметр зондирующего луча спектрофотометра составляет 5 мм, получим в исследуемой зоне в центре образца 2231 попаданий из 14000 с законом распределения по массам $P(m)$ и законом распределения по скоростям $P(v)$.

Диаметр кратера d_k в результате воздействия частицы с известной массой и скоростью можно оценить с помощью выражения из [2]:

$$d_k = 5 \cdot 10^{-4} d_p^{1.076} \rho_m^{-1/2} \rho_p^{0.743} V^{0.727} \cos^{0.601} \theta, \tag{3}$$

где ρ_m — плотность материала преграды; d_p — диаметр частицы; ρ_p — плотность материала частицы; V — скорость удара; θ — угол удара.

Учитывая, что диаметр частицы $d_p = (6m/\pi\rho_p)^{1/3}$, а скорость и масса частицы связаны известной зависимостью (рис. 2), получим суммарную площадь S_{Π} поврежденной поверхности образца:

$$S_{\Pi} = \frac{\pi}{4} \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} \left[5 \cdot 10^{-4} \left(\sqrt[3]{6m(V)/\pi\rho_p} \right)^{1.076} \times \right. \\ \left. \times \frac{\rho_p^{0.743}}{\sqrt{\rho_m}} V^{0.727} P(V) k \right]^2 dV, \tag{4}$$

где k — коэффициент повреждения околоратерной зоны за счет растрескивания и сколов. Для стекла $k = 2.5$ [1]. V_{\min} и V_{\max} — минимальная и максимальная скорости соударения. При этом относительная площадь поврежденной поверхности T_s в середине образца составляет

$$T_s = \frac{S}{\pi R_s^2}, \tag{5}$$

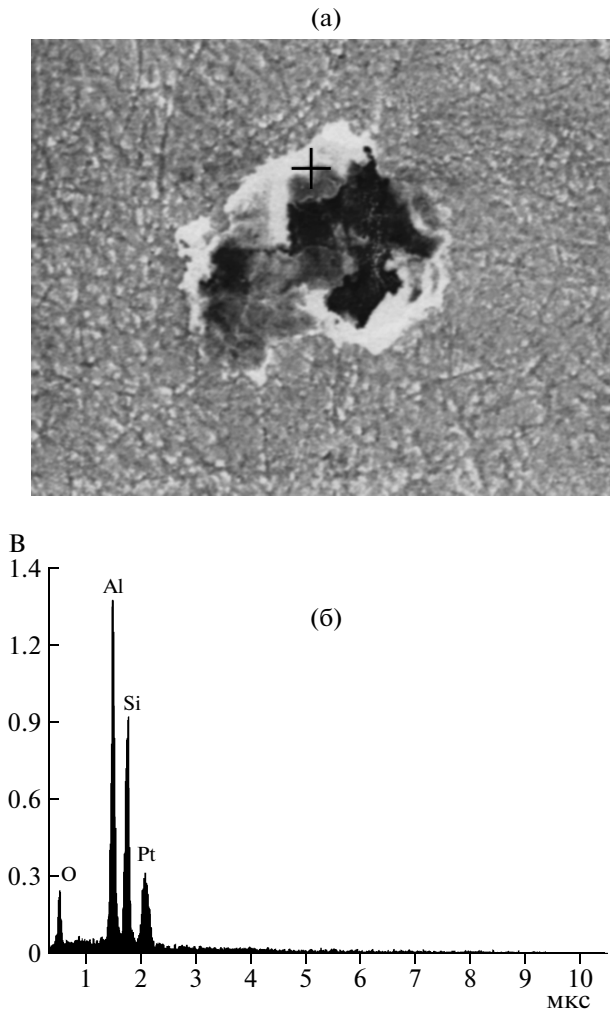


Рис. 4. а – фотография кратера на поверхности стекла, размер изображения 12×10 мкм; б – элементный состав поверхности в зоне кратера.

где R_s – радиус зондирующего луча спектрофотометра.

Подставив в (5) известные численные значения и законы распределения потока частиц, получим относительное повреждение поверхности в размере 3.5%.

Изменение спектрального коэффициента пропускания стекла (при использовании спектрофотометра UV-1800) показано на рис. 6.

Как видно из рис. 6, максимальное изменение коэффициента пропускания происходит в ультрафиолетовой области спектра при длине волны 0.38 мкм и достигает 2.4%. С увеличением длины волны эффективность ослабления существенно уменьшается. При длине волны < 0.35 мкм собственный коэффициент пропускания стекла стремится к нулю, поэтому оценить степень влияния поверхностных дефектов в этой области невозможно.

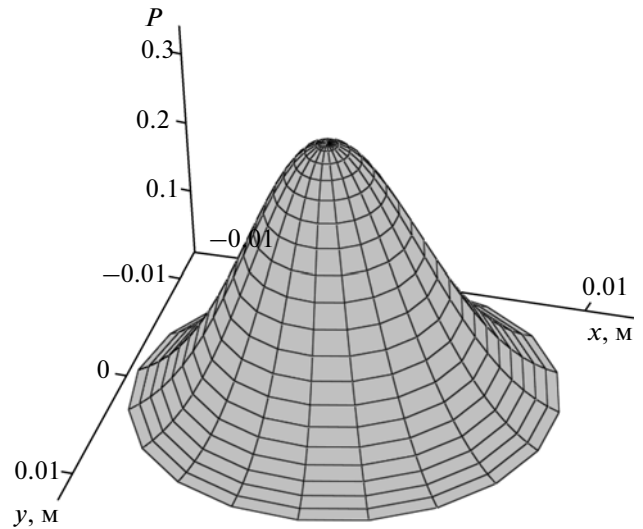


Рис. 5. Плотность распределения частиц по координатам на поверхности образца.

Фотографии типичных кратеров на стекле показаны на рис. 7.

АНАЛИЗ РАССЕЯНИЯ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТАХ ОПТИЧЕСКОГО СТЕКЛА

Для проверки эксперимента и получения количественных оценок рассеяния на поверхностных дефектах оптических элементов целесообразно использование подхода, основанного на уравнении переноса излучения и модельной системы в виде однорядного слоя частиц [4]. Введение этой модельной системы правомерно, так как, согласно теории однорядного слоя, в тех случаях, когда мощность переизлучения в слое радиации мала по сравнению с полной мощностью рассеянного излучения, можно воспользоваться приближением однократного рассеяния.

В первом приближении кратеры можно считать сферически симметричными. Реальные кратеры имеют размеры 0.2–5 мкм, поэтому необходима модель, описывающая взаимодействие видимого и и.к.-диапазона с такими типами неоднородностей.

Рассеяние на ансамбле частиц зависит от их взаимного расположения, определяющего характер суперпозиции рассеянных световых волн [5]. Поскольку распределение по площади поверхностных дефектов, образованных в результате бомбардировки оптических элементов частицами, должно подчиняться статистике Пуассона, то расчет характеристик рассеяния ансамбля существенным образом упрощается. Для системы неоднородностей, распределенных хаотическим образом, общая интенсивность определяется сложением



Рис. 6. Изменение спектрального коэффициента пропускания стекла К-8 при воздействии потока микрометеоритов.

интенсивностей, создаваемых отдельными рассеивателями.

В зависимости от глубины кратера набег фазы излучения, прошедшего через дефект, будет определяться двумя типами выражений:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \rho(\sin \gamma - \delta), \\ \Phi_2 &= \rho(\sin \gamma + \delta), \end{aligned} \quad (6)$$

где $\rho = kR(m - 1)$ – параметр дифракции; γ – полярный угол; R – радиус частицы, при столкновении с которой образовался дефект; $\delta = a/R$; a – расстояние от поверхности до центра частицы. Отношение a/R можно определить с помощью полуэмпирических формул [6]:

$$a/R = 2(\rho_p/\rho_m)^{0.6}(H_{B1}/H_{B0})^{0.33}(V/V_s)^{0.75}, \quad (7)$$

где H_{B0} и H_{B1} – соответственно твердости материалов и частицы; V_s – скорость звука в преграде.

Как видно из формулы, при известных материалах частицы и преграды, глубина залегания частицы является функцией ее скорости. Данная формула приведена для случая сферической частицы, сохранившей свою форму после удара, однако на практике ее можно применять для частиц произвольной формы. При этом считается, что центр частицы располагается в центре кратера.

Первое выражение соответствует случаю, когда глубина кратера меньше радиуса аэрозольной частицы, второе – когда глубина кратера больше. Используя выражения (6) для факторов эффективности ослабления излучения на пустотелых кратерах, получаем $Q_{осл1}$ для случая $a \leq R$ и $Q_{осл2}$ для случая $a > R$:

$$\begin{aligned} Q_{осл1} &= 2 - \frac{4\sin[\rho(1 - \delta)]}{\rho(1 - \delta^2)} + \frac{4[1 - \cos[\rho(1 - \delta)]]}{\rho^2(1 - \delta^2)}, \\ Q_{осл2} &= 2 - \frac{4}{\rho}\sin[\rho(1 + \delta)] + \\ &+ \frac{4}{\rho^2}[\cos(\rho\delta) - \cos[\rho(1 + \delta)]]. \end{aligned} \quad (8)$$

Изменение коэффициента пропускания при прохождении света через слой площадью S_Σ , образованный кратерами с функцией распределения по диаметрам $N_d(d_k)$, имеет вид

$$T = \frac{1}{S_\Sigma} \int Q_{осл}(\lambda, d_k) P_d(d_k) S_k(d_k) dd_k, \quad (9)$$

где $Q_{осл}(\lambda, d_k)$ – амплитудная функция поглощения на кратере с характерным диаметром d_k ; $S_k(d_k) = \pi d_k^2/4$ – площадь кратера; $P_d(d_k)$ – функция распределения кратеров по диаметрам на поверхности образца.

Результат вычислений по формуле (9) показан на рис. 8 (кривая 1). С учетом собственного спектрального коэффициента пропускания стекла

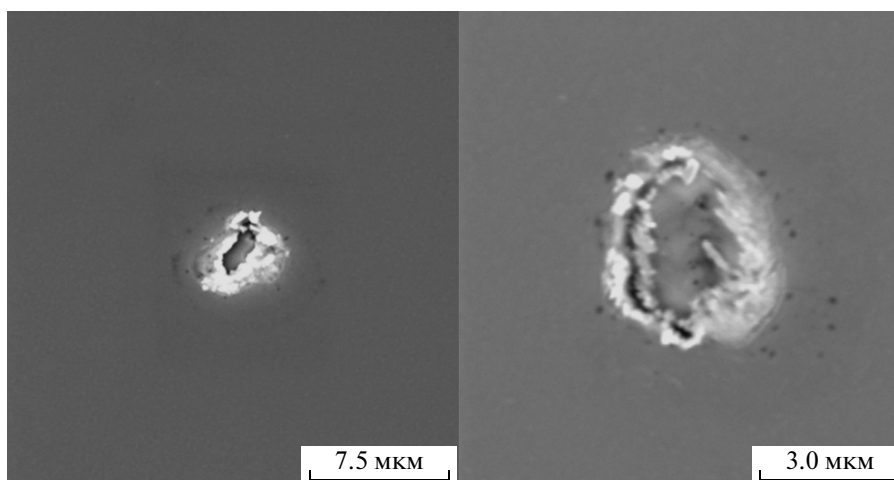


Рис. 7. Фотографии типичных кратеров на стекле.

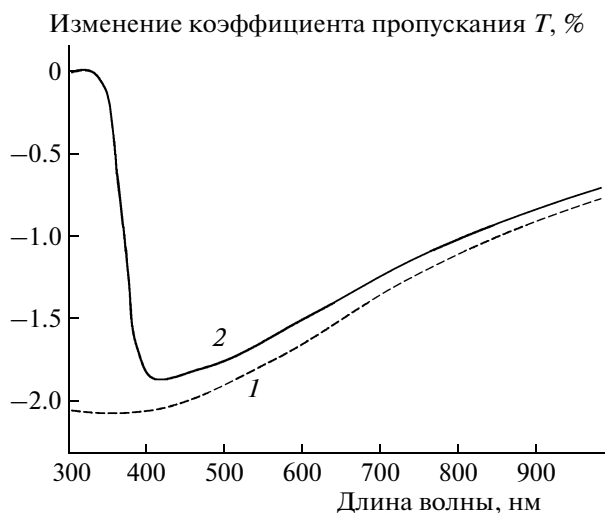


Рис. 8. Расчетное изменение спектрального коэффициента пропускания: 1 – поверхностного слоя из n дефектов; 2 – суммарное с учетом коэффициента собственного пропускания стекла.

К-8 толщиной 3 мм получим характеристику, показанную на рис. 8 (кривая 2).

Как следует из рисунков, математическое моделирование хорошо согласуется с результатами эксперимента (рис. 6). При этом экспериментальные данные несколько превышают расчетное изменение коэффициента пропускания стекла. Это обусловлено, в первую очередь, необходимостью изъятия образца из вакуумной камеры ускорителя, что неизбежно приводит к его дополнительному загрязнению. Один из путей устранения указанного явления – измерение оптических ха-

рактеристик стекла непосредственно в ходе эксперимента.

ВЫВОД

Описанная методика позволяет определить относительное изменение свойств поверхностных оптических элементов к.а. при воздействии потока микрочастиц с известными характеристиками. Используя полученные данные, можно составить аналогичный прогноз в реальных условиях при воздействии потоков микрометеоритов с известными законами распределения на орбите Земли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романченков В.П., Бровкин А.Г., Люлин И.Б. В кн.: Моделирование влияния факторов антропогенного загрязнения околоземного космического пространства на элементы конструкций и систем космических аппаратов. М.: Гидрометеиздат, 1992.
2. Hauptmann S., Drolshagen G. Second European conference on space debris. ESOC, Darmstadt, Germany, 17–19 March 1997, С. 195.
3. Семкин Н.Д., Пияков А.В., Воронов К.Е. и др. // ПТЭ. 2007. № 2. С. 140.
4. Ван де Хюлст. Рассеяние света малыми частицами. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1961.
5. Айзатулин С.К., Осипов В.П., Козлов В.А. В кн.: Моделирование влияния факторов антропогенного загрязнения околоземного космического пространства на элементы конструкций и систем космических аппаратов. М.: Гидрометеиздат, 1992. С. 234.
6. Семкин Н.Д., Воронов К.Е., Новиков Л.С. Регистрация пылевых и газовых частиц в лабораторных и космических условиях. Самарский государственный аэрокосмический университет, 2005. С. 99.