

УДК 53.091

Многослойные пленочные структуры в условиях воздействия микрометеороидов и частиц космического мусора

Н. Д. Семкин, М. П. Калаев, А. М. Телегин, А. В. Пияков, Д. В. Родин

Дано описание результатов лабораторных испытаний по воздействию потоков высокоскоростных частиц на различные многослойные элементы конструкции космического аппарата: конденсаторные датчики, терморегулирующие покрытия, тепловые трубы, оптические стекла с напылением и солнечные батареи. Рассмотрены методы проведения экспериментов с использованием лазерного, электростатического и взрывного ускорителя.

PACS: 07.87.+v

Ключевые слова: электростатический ускоритель, лазерный ускоритель, взрывной ускоритель, микрометеороид, деградация поверхности, многослойные пленочные структуры.

Введение

Последние два десятилетия характеризуются увеличением количества частиц космического мусора в околоземном космическом пространстве (ОКП), значительно превышающем потоки микрометеороидов [1—8].

Наряду с различного рода излучениями космической среды (протоны, электроны, тяжелые ядра ГКИ и др.) на летательные аппараты воздействуют частицы космического мусора, а также микрометеороиды. Как правило, открытыми элементами конструкций космических аппаратов (КА), воспринимающими такие воздействия, являются многослойные конструкции с различными покрытиями (терморегулирующие покрытия, тепловые трубы, теплообменники, оптические стекла, солнечные батареи, антенны, электровакуумная теплоизоляция и т. д.).

Частицы, не вызывающие сквозного пробоя указанных элементов, производят деградацию их поверхности, что приводит со временем к изменению оптических, электрических, механических и других характеристик, влияющих в целом на работоспособность КА. Для моделирования процессов взаимодействия частиц с многослойными элементами конструкций КА используют различного типа

ускорители [9—14]. Для исследования взаимодействия мелких частиц с массой 9—15 г применяются электростатические и электродинамические ускорители [15—21]; для частиц с массами 6—10 г электроплазменные и взрывные ускорители [22—29], а для более крупных частиц 10—100 г электромагнитные [30—33] и легкогазовые пушки [34—36].

Обычно толщина покрытий элементов КА составляет 10—100 мкм, а структура их состоит из послойной композиции металл—диэлектрик или металл—диэлектрик—полупроводник—металл. Есть еще более сложные композиции покрытий.

Воздействие высокоскоростных частиц на многослойные пленочные структуры

Рассмотрим результаты экспериментов с пленочными структурами металл—диэлектрик—металл—полупроводник в режиме сквозного пробивания и ударного сжатия.

В процессе исследования взаимодействия твердой частицы с МДМ-структурой рассматриваются три случая:

взаимодействие низкоскоростной частицы с диаметром, большим толщины диэлектрика, т. е. $d > h$, и скоростью $V = 50—100$ м/с;

исследование изменения проводимости в процессе ударного сжатия в пробиваемом и непробиваемом пленочном конденсаторе при скорости взаимодействия $W = 0,3—4,5$ км·с⁻¹;

исследование изменения проводимости за счет образования электрического разряда при скоростях взаимодействия частицы с конденсатором $W = 0,3—4,5$ км·с⁻¹.

Ударные эксперименты проводились с помощью электростатического ускорителя КГ-500 с

Семкин Николай Данилович, профессор.
Калаев Михаил Павлович, аспирант.
Телегин Алексей Михайлович, аспирант.
Пияков Алексей Владимирович, доцент.
Родин Дмитрий Владимирович, аспирант.
Самарский государственный аэрокосмический университет им. С. П. Королева (Национальный исследовательский университет).
Россия, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.
Тел. (846) 267-48-50. E-mail: sgau5@yandex.ru
Статья поступила в редакцию 14 мая 2011 г.

ускоряющим напряжением 500 кВ и электродинамического ускорителя с ускоряющим напряжением 650 кВ [37—39] в диапазоне масс частиц 10^{-11} — 10^{-14} г согласно методикам экспериментов, приведенным в [26, 38].

Для ударных экспериментов использовалась зарядка инжектора частицами Al, Fe, W со следующими размерами: 0,5—2 мкм для Al, Fe и 4—5 мкм для W. В качестве объектов исследования использовались тонкопленочные МДМ-структуры с диэлектриком толщиной $h = 2$ мкм из полистирола, с верхними и нижними обкладками, выполненными из напыленного слоя Al толщиной $(3—5) \cdot 10^{-8}$ м [39].

Процесс разряда конденсаторного датчика при механическом закорачивании обкладок проводящей частицей приближенно можно описывать с помощью выражений из работы [40].

Для моделирования ударного сжатия в МДМ-структуре (сжатие в пробиваемом и непробиваемом конденсаторе) использовались частицы Al с размерами 1—4 мкм, ускоренные до скоростей $W = 0,3—4,5$ км·с⁻¹.

При проведении практических расчетов для осуществления деления на пробиваемые и непробиваемые случаи можно воспользоваться эмпирическим уравнением, полученным на основе экспериментальных данных [40]. Толщина пробиваемого пленочного конденсатора равна:

$$h = K \cdot \rho_{\text{ч}}^{0,418} \cdot m^{0,352} \cdot W^{0,875},$$

где h — толщина конденсатора, см;
 W — скорость частицы, км·с⁻¹;
 m — масса частицы, г;
 $\rho_{\text{ч}}$ — плотность частицы, г/см³;
 K — постоянная зависящая от материала мишени и вычисляемая по формуле:

$$K = 0,816 \cdot \rho_{\text{м}}^{-0,5} \cdot \varepsilon^{-0,0562},$$

где $\varepsilon = 0,3$ — пластичность (удлинение в %);
 $\rho_{\text{м}}$ — плотность мишени.

Расчетные соотношения зоны разделения значений масс и скоростей частиц для пробиваемого и непробиваемого случая показаны на рис. 1. Для выявления раздельного влияния скорости и массы пылевой частицы проводилась нормировка сигнала с конденсатора по массе и скорости. Полученные зависимости вида $U_c/m = f(W)$ для ударно-сжатого конденсатора приведены на рис. 2.

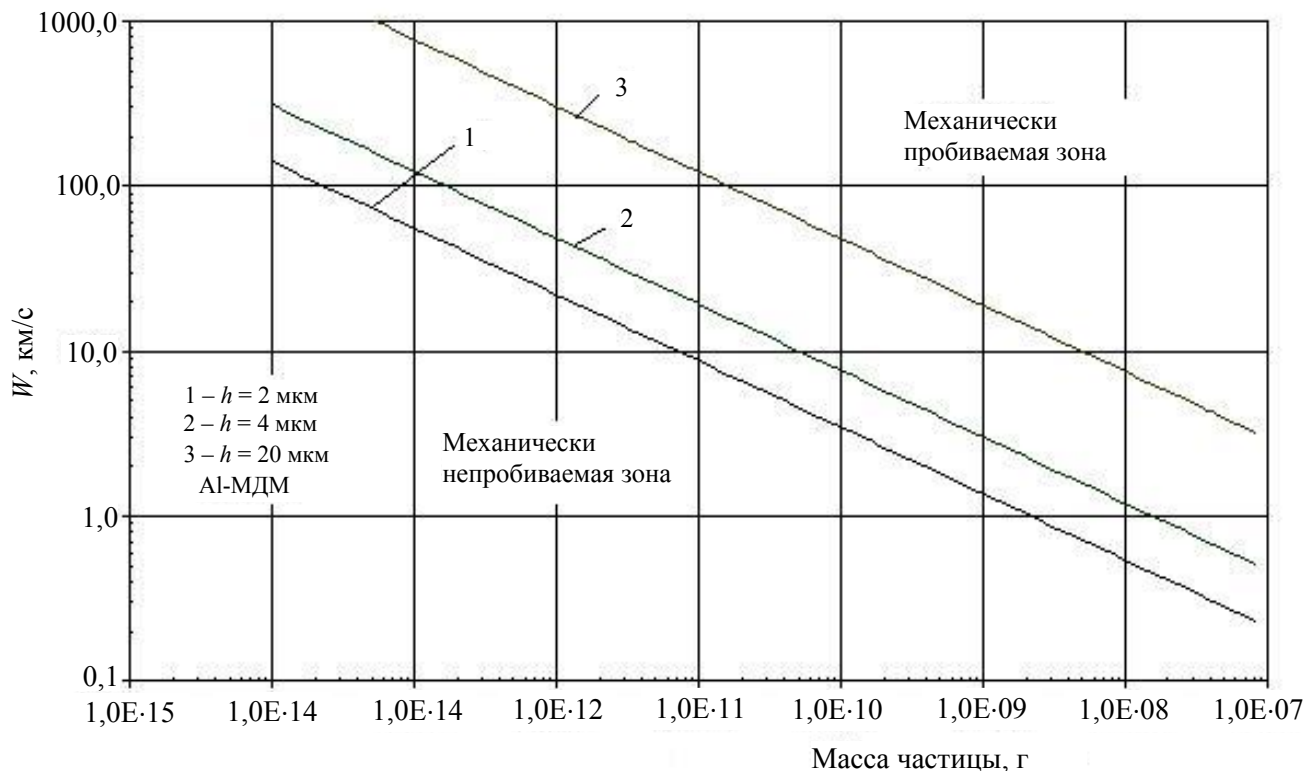


Рис. 1. Расчетная зависимость зоны механического пробоя конденсаторных датчиков

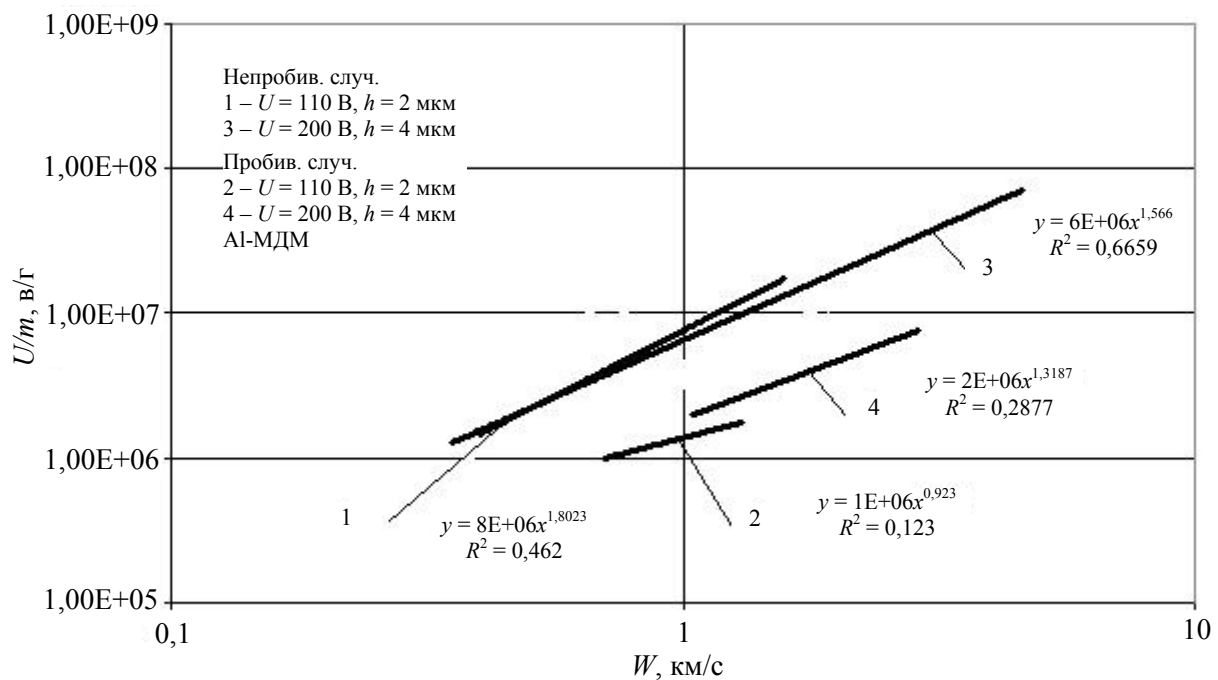


Рис. 2. Зависимость амплитуды сигнала, нормированного на массу с ударно-сжатого конденсатора U/m от скорости W пылевой частицы

На основе проведенных экспериментов [39] получена зависимость сигнала с ударно-сжатой МДМ-структуры вида: $U_c = c \cdot m^\alpha \cdot W^\beta$, где $\alpha = 0,28 \pm 0,1$, $\beta = 1,8 \pm 0,1$ (для $h = 2$ мкм), $\alpha = 0,65 \pm 0,1$, $\beta = 1,56 \pm 0,1$ (для $h = 4$ мкм), характеризуют "непробиваемый" случай и $\alpha = 0,25 \pm 0,1$, $\beta = 0,92 \pm 0,1$ (для $h = 2$ мкм), $\alpha = 0,65 \pm 0,1$, $\beta = 1,31 \pm 0,1$ (для $h = 4$ мкм) определяют "пробиваемый" случай.

Исследование процесса электрического закорачивания обкладок конденсатора проводилось с помощью ускорителя ЭГ-8 с ускоряющим напряжением 1,6 МВ. В экспериментах использовались частицы алюминия с характерными размерами 1—4 мкм, скорости частиц 3—12 км·с⁻¹. Моделирование проводилось с использованием двух круглых пленочных конденсаторов: датчик № 1 с $D = 80$ мм, $C_d = 88$ нФ с толщиной диэлектрика $h = 2$ мкм, с напыленными алюминиевыми обкладками с толщиной $l = 0,035$ мкм и датчик № 2 с $D = 50$ мм, $C_d = 58$ нФ, $h = 2,1$ мкм, с обкладками из Au с $l = 0,02$ мкм.

Сквозные отверстия первого типа представляют собой достаточно ровные сферические отверстия с оплавленными краями с диаметром $d = 3$ —8 мкм без видимого повреждения обкладок в окрестностях отверстий (рис. 3, а). Отверстия второго типа представляют собой часто несферические отверстия с частично оплавленными краями, диаметром $d = 10$ —20 мкм с характерным отслоением обкладок в окрестностях отверстий (рис. 3, б). Достаточно часто в центре отверстий второго типа наблюдается застрявшая частица размером 10 мкм.

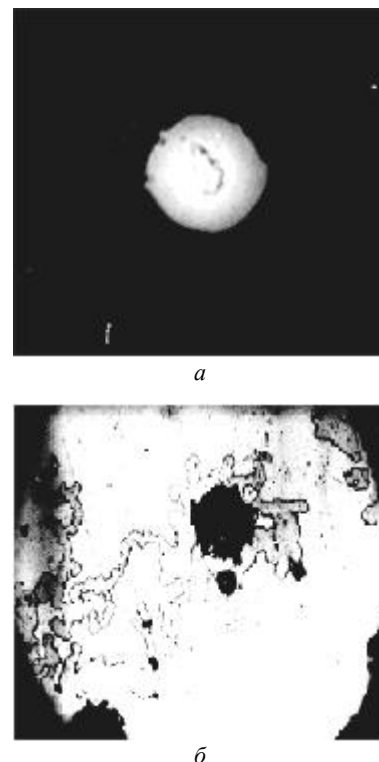


Рис. 3. Фотография отверстия в конденсаторном датчике:
а — случай высокоскоростного соударения;
б — случай низкоскоростного соударения

По результатам анализа можно предположить наличие двух механизмов закорачивания обкладок конденсатора:

за счет создания проводимости, стимулирующей электрической пробой конденсатора при соударении с ним высокоскоростной частицы наибольшей массы (отверстия первого типа);

за счет механического закорачивания обкладок конденсатора проводящей частицей с размерами $r_k > h$ или в результате увеличения проводимости (плотности тока) большей критического значения, соответствующего началу электрического пробоя при взаимодействии с конденсатором низкоскоростной частицы большой массы (отверстие второго типа).

Так как в процессе электрического пробоя участвуют частицы с достаточно узким диапазоном масс и скоростей $m = 5 \cdot 10^{-12} - 10^{-10}$ г, $W = 0,4 - 3$ км·с⁻¹, непробиваемый случай означает внедрение частицы в диэлектрик. Увеличение массы и скорости частицы приводит к увеличению глубины кратера с более тонким оставшимся слоем диэлектрика у вершины кратера, что, в свою очередь, приводит к резкому локальному увеличению напряженности и возникновению электрического либо теплового пробоя.

На практике основная часть пленочных покрытий наносится на поверхности элементов конструкций космических аппаратов, поэтому важным является изучение поведения таких покрытий, наносимых на полубесконечной преграде с точки зрения теории высокоскоростного удара.

Рассмотрим процессы, происходящие в структуре металл—диэлектрик—металл—люминофор (или какое-то более сложное соединение), нанесенный на полубесконечной преграде [41, 42]. Такие структуры используются в качестве детекторов, например, при исследовании микрометеороидов [43].

Эксперименты выполнялись с помощью экспериментального ускорителя типа КГ-500 и ЭГ-8 в диапазоне масс $10^{-14} - 10^{-12}$ г и скоростей 0,5—10 км·с⁻¹ алюминиевых и хромовых частиц.

Блок-схема экспериментальной установки приводится на рис. 4 [42] и содержит электронный ускоритель 1, цилиндр Фарадея 2, усилители 3, люминесцентно конденсаторную структуру 4—8, фотоэлектронные умножители (ФЭУ) 9, 11, вторично-электронный умножитель (ВЭУ) 10, осциллографы 12. Люминесцентно-конденсаторная структура состоит из конденсатора (металл — верхняя обкладка 8 толщиной $h = 0,1$ мкм, диэлектрик 7 толщиной $h_d = 1$ мкм, нижняя обкладка 6 из меди толщиной 50 мкм, люминофор 5 с толщиной 50 мкм, стеклянная колба 4).

Акт взаимодействия частицы с поверхностью структуры (ударная вспышка и образование ионов, электронов) регистрируется с помощью ФЭУ 11, вторичные заряженные частицы (электроны, ионы, частицы мишени) с помощью ВЭУ 10. Ударное возбуждение люминофора (вспышка) 5 регистрируется с помощью ФЭУ 9 и осциллографа 12.

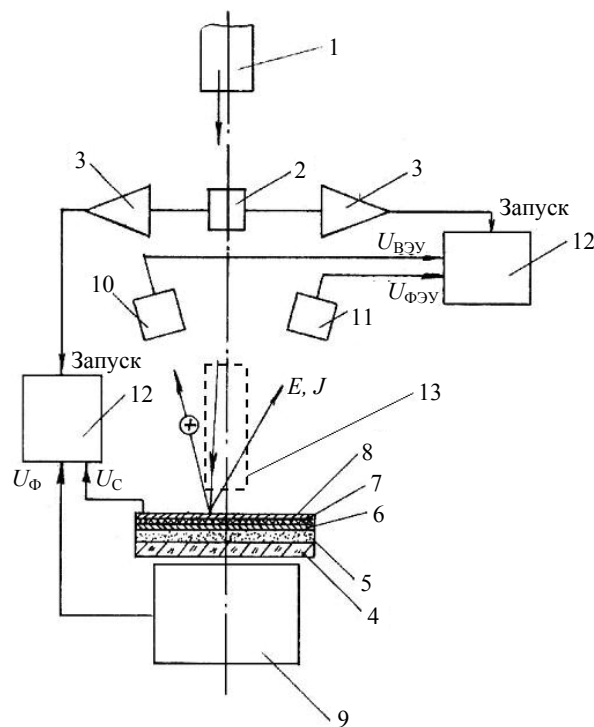


Рис. 4. Блок-схема экспериментальной установки

С помощью такого стенда проводится изучение процессов взаимодействия частиц с различными многослойными структурами. Экспериментально установлено, что при полном пробое конденсатора количество ионов, регистрируемое с помощью ВЭУ 10, в 10^2 раз больше, чем в случае высокоскоростного взаимодействия частицы с металлической мишенью. Вспышка света, регистрируемая ФЭУ 11 при пробое конденсатора, более чем в 10 раз превосходит по интенсивности излучения вспышку, возникающую в отсутствие пробоя.

Ускорение частиц при помощи импульсного лазера

Значительный интерес в технике высокоскоростного удара представляет ускорение с помощью импульсных лазеров [44—49]. Приведем результаты ударных экспериментов с пленочными МДМ-структурами с помощью ускорителя на основе импульсного лазера ГОС-301, блок-схема которого приведена на рис. 5, а. Частицы из железа и вольфрама массами $5 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-5}$ г ускоряются в диапазоне скоростей 50—800 м·с⁻¹ [48].

Ускоритель содержит лазер 1 с длительностью импульса 1 мс, фокусирующую систему 2. Лазер использовался для создания высокотемпературного ионизированного газа, который ускоряет частицу 3, предварительно установленную в стеклянном капилляре 4. На некотором расстоянии от капилляра устанавливается исследуемая МДМ-структура 7, на которую подается напряжение U . Сиг-

нал с конденсаторной структуры подается на один канал запоминающего осциллографа С8-2, на другой вход которого поступает запускающий импульс с лазера для фиксации начала процесса ускорения.

В качестве материала для образования плазмы использовалась алюминиевая фольга 5 толщиной 30—40 мкм, установленная в вакуумной камере 6. Камера выполнена с учетом возможности проведения экспериментов при нормальном давлении среды и в условиях вакуума.

Камера с фольгой разделялась с внешней камерой вакуумной установки, в качестве которой использовался универсальный вакуумный пост типа ВУП-4. Варьирование скоростей частиц достигалось изменением мощности в импульсе путем изменения напряжения накопителя, а также фокусирующей системы 2, с помощью которой достигались большие плотности мощности, превращающие фольгу в плазму. Эксперименты проводились с частицами из стекла Ø350 мкм, железа Ø80 и 40 мкм со скоростями, соответственно, 35, 160, 820 м·с⁻¹. Зависимость сигнала напряжения с конденсатора от энергии частицы представлена на рис. 5, б.

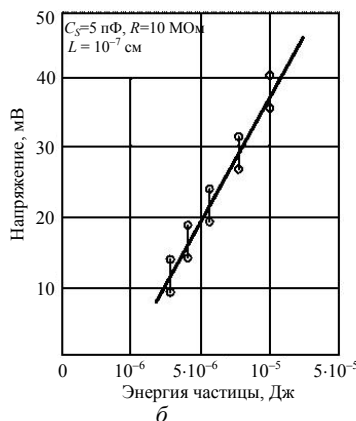
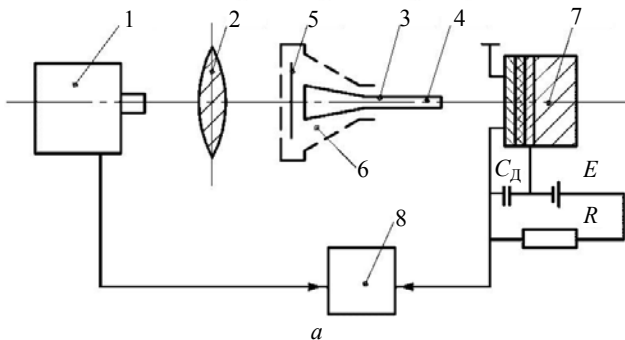


Рис. 5. Блок-схема экспериментальной установки для ускорения частиц (а), пояснения в тексте; зависимость напряжения с конденсатора от энергии частицы (б)

В качестве диэлектрика конденсаторной структуры 7 использовалась нанесенная по методике [50] пленка полиметилметакрилата толщиной ~1 мкм. Верхняя обкладка из меди дополнительно

наращивалась гальваническим путем до 100—500 мкм. Емкость конденсатора составляла 5·10⁻⁹ Ф.

Для моделирования высокоскоростных частиц с размерами в несколько микрометров перспективным является применение ускорителя на основе наносекундного импульсного лазера на неодимовом фосфатном стекле [49] с параметрами пучка: энергия лазерного излучения ~200 Дж, плотность потока — 10¹³—10¹⁴ Вт/см², длительность импульса ~2 нс, длина волны — 1,054 мкм. Экспериментальная установка на основе такого лазера показана на рис. 6 и содержит лазер 1, фокусирующую систему 2, лавсановую фольгу 3 толщиной 10 мкм с наклеенными на ней частицами из вольфрама 5—6 мкм и преобразователь в виде шара 4 с окном из пленочной МДМ-структуры, в центре которого установлен приемник ионов. Фольга 3 и преобразователь 4 установлены в вакуумной камере. При пробое фольги из пленочной структуры преобразователя возникающая плазма с помощью приемника ионов 5 регистрируется запоминающим осциллографом 6.

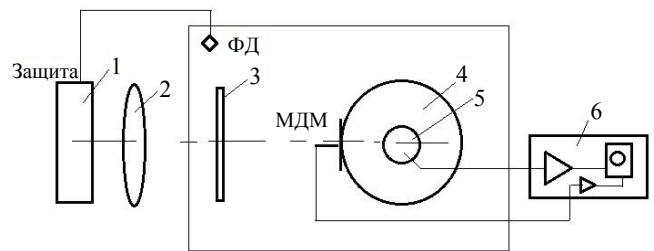


Рис. 6. Блок-схема экспериментальной установки

На рис. 7 приведена зависимость амплитуды сигнала с преобразователя и скорости частицы от энергии импульса лазера. Время T пролета частицы с момента срабатывания лазера (фотодиодов ФД) до пробоя МДМ-структуры связано со скоростью V соотношением $V = L/T$, где L — расстояние между фольгой и МДМ-структурой. При лазерной энергии E = 120 Дж для частицы из вольфрама с диаметром 6 мкм нами впервые получена скорость порядка 37 км·с⁻¹.

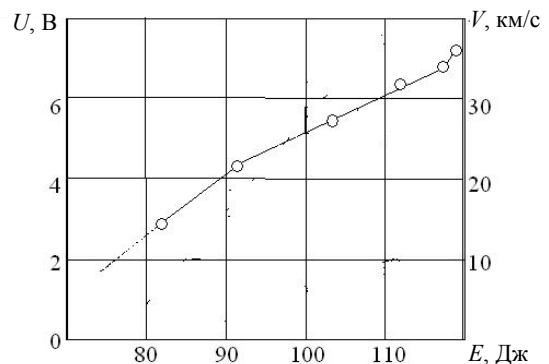
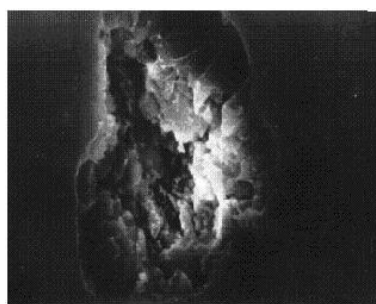


Рис. 7. График зависимости скорости пылевой частицы и амплитуды сигнала с приемника ионов от энергии импульсного лазера

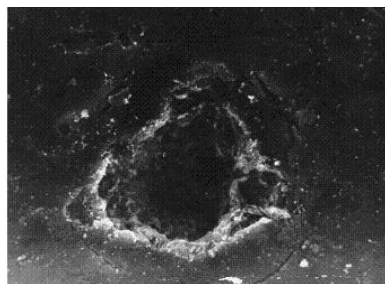
Воздействие высокоскоростных частиц на тепловые трубы

Для высокотемпературных тепловых труб (ТТ) как важных элементов конструкции КА, например, его ядерной энергетической установки (ЯЭУ), наибольшую опасность представляют техногенные частицы (космический мусор). При разгерметизации ТТ жидкий теплоноситель (например, литий, натрий) выходит в открытое пространство. Такие случаи представляются наиболее опасными в связи с загрязнением окружающей среды. Стенка тепловой трубы представляет собой многослойную структуру металл—диэлектрик—металл—полупроводник. В [51, 52] на основе разработанных моделей проведен анализ истечения жидкого теплоносителя из ТТ ядерной энергетической установки в результате взаимодействия с твердыми высокоскоростными частицами.

Эксперименты по пробиванию стенки ТТ в виде структуры Nb—Al₂O₃—манганит лантана (чернотное покрытие) с толщиной последовательных слоев 0,3, 0,1 мм, соответственно, проводились с помощью электромагнитного ускорителя [51] частицами в форме проводников Ø0,2 мм и длиной $l = 4$ мм. Для указанной структуры определена пробивная скорость, составляющая $\sim 5,3$ км·с⁻¹. На рис. 8 показаны случаи образования кратера (а) и сквозного пробивания (б). Наблюдается откол чернотного покрытия на большой площади, в несколько раз превышающий размеры сквозного отверстия (вид слева), при выходе волны разгрузки на поверхность ТТ. Для стенки ТТ, нагретой до температуры 900 °С, предельное значение пробиваемой скорости практически не изменилось.



а



б

Рис. 8. Случаи образования кратера (а) и сквозного пробивания (б)

Влияние потоков мелкодисперсных частиц (Ø5—50 мкм) на оптические характеристики ТТ экспериментально изучалось с помощью ускорителя взрывного типа, а также электростатического ускорителя в диапазоне масс 10^{-14} — 10^{-12} г. Материал частиц — графит, сажа, Al₂O₃, Al, TiC, Fe, W. Диапазон частиц по скоростям — 15—10 км·с⁻¹.

Величина плотности потока частиц в экспериментах с взрывным ускорителем находилась в пределах 0,1—0,5 г·м⁻². В экспериментах с электростатическим ускорителем суммарная величина плотности потока частиц имела такую же величину. Результаты экспериментов показывают, что коэффициент поглощения чернотных покрытий As значительно увеличивается, а именно, с 0,15 до 0,4, а коэффициент черноты ϵ изменяется незначительно, т. е. с 0,9 до 0,92. В экспериментах в качестве чернотных покрытий на ТТ использовались манганит лантана, хромид лантана и шпинель.

Теоретические и экспериментальные исследования характеристик тепловой трубы в условиях воздействия высокоскоростных частиц позволили сделать следующие выводы: коэффициент поглощения As увеличивается с 0,15 до 0,45 при воздействии потока частиц 0,1—0,55 г·м⁻², эквивалентного воздействию частиц с массами 10^{-12} — 10^{-9} г и скоростями 1—30 км·с⁻¹ в космических условиях в течение времени, приблизительно, равного 3—3,5 года.

Учитывая современные представления о распределении частиц космического мусора и микрометеороидов, а также лабораторные эксперименты, проводимые с помощью электромагнитного ускорителя, представляется возможным оценка оптимальной толщины ниобиевой стенки тепловой трубы, вероятности ее целостности при эксплуатации в натуральных условиях. Применение электромагнитных ускорителей в экспериментах по изучению взаимодействия частиц с массой 10^{-3} —10 г в диапазоне скоростей 1—8 км·с⁻¹ с различными тонкостенными конструкциями КА (радиаторы, ЭВТИ, теплообменники, защитные экраны и т. д.) является перспективным направлением в физике и технике высокоскоростного удара.

Воздействие высокоскоростных частиц на терморегулирующие покрытия

Взаимодействие высокоскоростной частицы с терморегулирующими покрытиями (ТРП) исследовалось с помощью электростатического и взрывного ускорителей [53]. Использовался генератор взрывного типа для создания потоков частиц на основе конденсированных взрывчатых веществ, в которых содержатся исследуемые час-

тицы, что позволило исследовать эффекты взаимодействия их с различными ТРП в диапазоне скоростей соударения $0,5\text{--}7\text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$. В качестве частиц использовались порошки различных металлов и их соединений с размерами от 5 до 50 мкм. Исследования проводились в вакуумных камерах при остаточных давлениях $10^{-2}\text{--}10^{-4}$ Торр ст. и 10^{-5} Торр (в случае электростатического ускорения).

Диагностика модельных потоков частиц и измерение их скоростей проводились с помощью люминесцентного пьезо- и электронных датчиков, динамических импакторов и лазерных средств, реализующих пролетную методику, а также конденсаторных пленочных структур [53—55].

В качестве ТРП использовались образцы, применяемые в настоящее время на КА. Исследовались образцы ТРП, относящиеся к четырем классам: солнечные отражатели ($A_s \approx 0$, $\varepsilon = 1$), солнечные поглотители ($A_s \approx 1$, $\varepsilon \approx 0$), истинные отражатели ($A_s \approx 0$, $\varepsilon \approx 0$) и истинные источники ($A_s \approx 1$, $\varepsilon \approx 1$). Покрытия наносились на алюминиевые пластины.

В качестве количественных характеристик воздействия потока частиц на ТРП использована удельная кинетическая энергия: $E_{уд} = \rho_F V_{cp}^2 / 2$, где V_{cp} — средняя скорость соударения потока частиц с преградой, и коэффициент повреждения поверхности — отношение суммы площади дефектов к площади образца S^0 , т. е. $K_S = \Sigma S_d / S^0$.

Измерение оптических характеристик образцов ТРП осуществлялось до и после ударных экспериментов. Для определения интегральных значений A_s использовались фотометры, для ε — терморadiометры с диапазонами спектральной чувствительности от 0,3 до 2,4 мкм и от 4 до 40 мкм, соответственно. Основными задачами экспериментов являлось определение характера взаимодействия частиц с ТРП и оценка изменений A_s и ε в зависимости от параметров потока частиц и их материалов, а также параметров деградации.

Ускорение частиц с помощью взрывного ускорителя

Блок-схема экспериментальной установки взрывного типа изображена на рис. 9. Она содержит вакуумную камеру, в которой устанавливается источник частиц 1, датчик для регистрации и измерения параметров потока пылевых частиц 2; на фиксированном расстоянии от источника 1 установлены исследуемые покрытия 3 и 4 (покрытие 4

находится под углом 80° к потоку частиц в целях изучения "косого удара"). В непосредственной близости от поверхности исследуемого покрытия установлены два электрода ионизационного датчика 5 в виде плоских пластин параллельно друг другу, на которые подано постоянное напряжение 200 В. Пластины соединены с интегратором 6, выход которого соединен с запоминающим осциллографом 7 типа С8-17 и шлейфовым осциллографом 8.

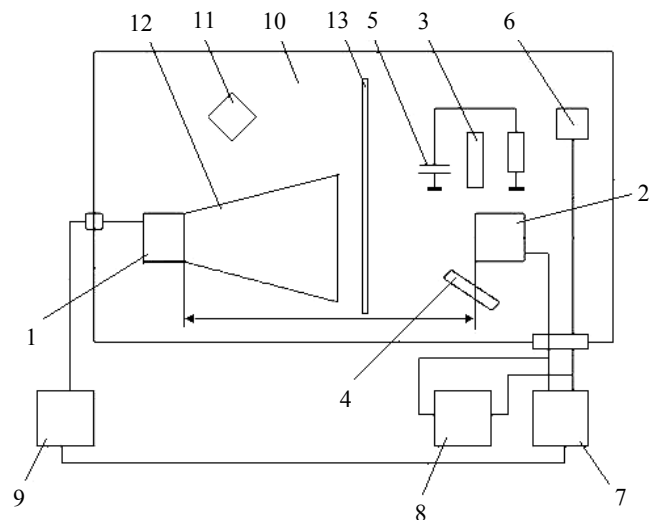


Рис. 9. Ускоритель взрывного типа:

- 1 — таблетка ВВ + частицы; 2 — регистратор частиц;
- 3 и 4 — исследуемые образцы; 5 — ионизационный датчик;
- 6 — интегратор; 7, 8 — осциллографы; 9 — устройство поджига; 10 — вакуумная камера; 11 — фотодиод;
- 12 — зона разлета частиц; 13 — пленочная МДМ-структура

Поджиг источника частиц осуществляется от устройства 9, генерирующего импульс напряжения. Источник частиц 1 представляет собой взрывчатое вещество (ВВ) — гексоген, тетрил, октоген, в котором замешаны исследуемые частицы определенного материала (Al, W, Al_2O_3 , C, Ti и т. д.), причем соотношение массы взрывчатого вещества и массы частиц составляет 5:1. Размеры частиц составляли 1—50 мкм. Результаты экспериментов помещены в табл. 1 и 2. Масса таблетки из гексогена составляла 9 г. Количество частиц в потоке на 1 см^2 лежало в пределах $10^2\text{--}5\cdot 10^3$, в зависимости от их размеров. Количество частиц определялось с помощью алюминиевой фольги толщиной 20—30 мкм, установленной на одной линии с исследуемыми покрытиями, причем в непосредственной близости от них. Количество частиц на 1 см^2 (с учетом их распределения по скоростям) пересчитывалось на поток $n\cdot V$. Начало процесса (взрыв источника частиц 1) фиксируется с помощью фотодиода 11, соединенным со входом запуска осциллографа 7.

Таблица 1

Матрица мишени — ТРП (Al₂O₃), (Z₂O₂)

№ п/п	Ориентация образца	Расстояние до образца, мм	Вакуум, мм рт. ст.	Материал частиц	Скорость частиц у образца, км/с	A _S		ε	
						до облучения	после облучения	до облучения	после облучения
1	⊥	104	2,6·10 ⁻³	Сажа	8,1	0,15	0,61	0,9	0,92
2	⊥	107	3,2·10 ⁻³	Графит	3,4—4,4	0,15	0,43	0,9	0,91
3	< ~80°	107	3,2·10 ⁻³	Графит	3,4—4,4	0,15	0,28	0,9	0,92
4	⊥	103	1,4·10 ⁻³	Al < 100 мкм	4,8—6,2	0,15	0,53	0,9	0,93
5	⊥	100	4,2·10 ⁻³	W, 8—15 мкм	2,4—3,2	0,15	0,48	0,9	0,90
6	⊥	103	2,8·10 ⁻³	Fe, 8—15 мкм	3,2—4,0	0,15	0,55	0,9	0,92
7	⊥	103	2,6·10 ⁻³	Пудра ПАП-2	3,0—3,2	0,15	0,67	0,9	0,93
8	⊥	103	2,8·10 ⁻³	Al ₂ O ₃ , 50 мкм	3,5—4,0	0,15	0,67	0,9	0,90
9	⊥	103	3,2·10 ⁻³	Al, 4—5 мкм	≤ 2	0,15	0,32	0,9	0,93
10	⊥	101	3,0·10 ⁻³	TiC, 3—5 мкм	1,5—1,7	0,15	0,49	0,9	0,90

Примечание. Заряд — 9 г, состав — тетрил + 0,5 г вольфрамовых частиц, вакуум — 1,2·10⁻² Торр, скорость начала фронта частиц — 1,2 км/с, база — 1,8 м, плотность потока частиц — 0,7·10⁶ частиц/(см²·с).

Таблица 2

Оптические характеристики ТРП

Вид покрытия	ε ₀	ε ₁	A _{S0}	A _{S1}	S _B , %	S _н , %	S _п , %	S _с , %
Анодное	0,86	0,862	0,2	0,717	0,8	0,13	9	1
Черное	0,94	0,94	—	0,038	0,26	0,22	9	1
ЭМ-40	—	0,92	0,15	0,43	0,33	0,17	9	1
МСН-7	—	0,87	—	0,65	0,7	1,9	9	1

Примечание. Заряд — 9 г, состав — тетрил + 0,5 г вольфрамовых частиц, вакуум — 5·10⁻³ Торр; экран — 5 мкм; скорость начала фронта частиц — 2,2 км/с; база — 1 м; плотность потока частиц — 1,3·10⁶ частиц/(см²·с); ε — исходный коэффициент черноты; ε₁ — коэффициент черноты после воздействия на образец частицами; A_{S0} — исходный коэффициент поглощения; A_{S1} — коэффициент поглощения после воздействия; S_B — площадь кратеров от высокоскоростных частиц, %; S_н — площадь кратеров от низкоскоростных частиц, %; S_п — площадь, занятая пылью по отношению к площади образца, %; S_с — площадь кратеров от сажи, %.

С помощью электронного и оптического микроскопов исследовались анодноокисные покрытия, покрытия типа МСН-7. Покрытия черные анодноокисные типа ЭМ-40 не удалось исследовать с помощью оптического микроскопа, так как покрытие марки ЭМ-40 имеет большую шероховатость, и глубины резкости при большом увеличении оказывается недостаточной. На черной анодноокисной поверхности не просматриваются кратеры, частички грязи ни в косых, ни в поляризованных лучах из-за высоких значений коэффициента черноты.

Покрытия типа ЭМ-40 и МСН-7 обладают высоким поверхностным сопротивлением, поэтому для анализа на них напылялись пленки серебра толщиной 0,5—1 мкм. Приведены исследования с помощью микроскопа РЭМ-100У, позволяющего просматривать элементы поверхности покрытия.

С помощью электронного микроскопа оценивалась площадь, занимаемая пылью. Для этого проводилось фотографирование 5—8 участков поверхности образца с увеличением 500—550 и находилось отношение площади, закрытой пылью, к общей площади образца.

Как видно из табл. 2, на светлых покрытиях после их облучения заданным потоком частиц коэффициент черноты возрастает.

У черных покрытий коэффициент черноты практически не меняется от плотности потока частиц.

Для анодноокисных покрытий коэффициент поглощения при общей площади кратеров, составляющей 0,2 % от общей площади образца, а площади пыли 2 %, увеличивается с 0,2 до 0,6—0,7.

Черные покрытия практически не меняют своих начальных значений коэффициентов ε и A_S после воздействия потока частиц. Для МСН-7 наблюдается уменьшение коэффициента черноты с увеличением общей площади кратеров.

Площадь кратеров у толстых покрытий значительно больше, чем у тонких за счет скола кромки кратера.

Эксперименты с ТРП выполнены также с помощью каскадного ускорителя с ускоряющим напряжением 200 кВ и ускорителя Ван де Граафа с ускоряющим напряжением 1,5 МВ. При этом частицы с массами 10⁻¹³—10⁻¹¹ г ускорялись до скоростей 10—12 км·с⁻¹ [44, 45]. Материал частиц — Fe, Al, Al₂O₃ и SiO₂.

Результаты экспериментов приведены в табл. 3.

Общее количество частиц, взаимодействующих с ТРП, составило ~ 10⁴—5·10⁴.

Материал покрытия ТРП — ZrO₂. Эксперименты показали, что коэффициент поглощения возрастает с 0,15 до 0,37—0,41, а коэффициент черноты ε изменяется незначительно.

Таблица 3

Результаты экспериментов с электростатическим ускорителем частиц

Ориентация образца		Расстояние до образца	Вакуум, мм рт. ст.	Материал	Скорость частиц, км·с ⁻¹	A _S		ε	
						До облучения	После облучения	До облучения	После облучения
1	⊥	6	10	Fe 0,1 мкм	5—6	0,15	0,37	0,9	0,91
2	⊥	7	10	Al 0,5—1 мкм	3—4	0,15	0,31	0,9	0,91

Достоинством взрывного ускорителя является возможность облучения частицами большой площади образцов ($\geq 1 \text{ м}^2$), а также высокой эффективности проведения экспериментов. Результаты таких экспериментов позволяют прогнозировать состояние ТРП, облучаемых в течение длительного времени в космических условиях.

Наиболее чувствительными к механическому воздействию частиц являются ТРП с хрупкими поверхностными слоями. Здесь типичным дефектом является скол слоя краски в месте удара частицы. Скол имеет фору круга с центром в точке удара и незначительное повреждение материала подложки, причем диаметр откола в несколько раз превышал диаметр частицы уже при скоростях 3—5 км·с⁻¹.

Еще большие разрушения возникают при воздействии частиц на образцы ТРП из хрупких материалов (стекла). Область разрушения составляет порядка 10 диаметров частицы, от которой во все стороны расходится множество трещин. Степень изменения параметров ТРП может считаться прямо пропорциональной доле площади поверхности, занятой дефектами, образованными в результате воздействия на нее потока частиц. В соответствии с этим изменение оптических свойств поверхности происходит нелинейно и наиболее заметно при малых уровнях повреждения поверхности, где носит характер процесса с насыщением.

Таким образом, при разреженных потоках частиц, попадающих на поверхность элемента системы терморегулирования КА при длительном его функционировании на орбите в условиях загрязнения околоземного космического пространства, деградация его оптических свойств в первом приближении может описываться соотношением вида:

$$K_p = 1 - (1 - K^\infty) \exp(-(1 - K^\infty)K_S), \quad (1)$$

где K_p — коэффициент изменения параметра, равный отношению измеренного после эксперимента значения исследуемого параметра P (A_S или ε) к исходному P^0 , т. е. $K_p = P/P^0$; K^∞ — предельное значение этого коэффициента.

Как правило, большую часть поверхности КА покрывают электровакуумной теплоизоляцией (ЭВТИ), представляющей собой многослойную пленочную структуру толщиной 15—20 мкм. Ко-

личество слоев металл—диэлектрик—металл может находиться в пределах 15—20. Для проведения экспериментов с многослойными пленочными структурами использовался электроплазменный ускоритель, блок-схема которого показана на рис. 10.

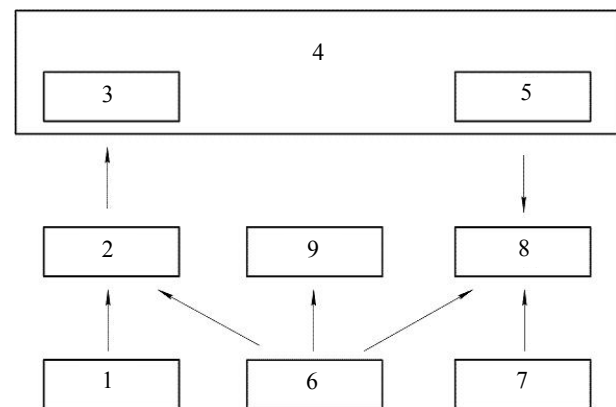


Рис. 10. Блок-схема установки для проведения модельных экспериментов (электроплазменный ускоритель)

Энергия накопительных конденсаторов 1 подводится к двум медным стержням, соединенным между собой проволочками и фольгой с наклеенными на нее частицами. В момент подачи импульса с высоковольтного генератора импульсного напряжения 6 разрядник 2 пробивается, и энергия конденсаторов превращает проволочки, фольгу в сгусток плазмы, имеющую скорость 80—100 км·с⁻¹. Плазма разгоняет частицы. Для уменьшения нежелательного воздействия плазмы на исследуемые мишени 5 предусмотрен отсекающий плазмы 4, который уменьшает ее воздействие на мишень. В качестве мишени также использовался многослойно-конденсаторный детектор многослойной МДМ-структуры (ЭВТИ).

Для синхронизации высокоскоростного фоторегилятора 9 и запуска развертки двухканального запоминающего осциллографа 8 служит сигнал с высоковольтного генератора импульсного напряжения. Для задержки момента запуска развертки осциллографа относительно момента поджига разрядника на время пролета частиц от патрона 3 до мишени 5 используется линия задержки 7. Измерение скоростей частиц проводилась контактным способом.

На мишень, в качестве которой использовалась фольга 10—15 мкм, направлялся источник света.

При пробое частицей фольги через образовавшееся отверстие свет попадал на СФР, включение которого совпадало с моментом разряда накопительных конденсаторов. Измерения проводились на фотопленке с фиксацией начала процесса и появления светового "следа" с учетом скорости регистрации и расстояния пролета частицы до мишени. В работе [56] приведены эксперименты с многослойными структурами (ЭВТИ). В табл. 4 и 5 показаны зависимости числа пробиваемых слоев ЭВТИ от параметров частиц в экспериментах с электроплазменным и взрывным ускорителем.

Таблица 4

Зависимость числа пробиваемых слоев ЭВТИ от параметров частиц

Электроплазменные усилители	
Размер частиц, мкм	Число пробиваемых слоев
200	50
150	35
100	20
200	30+A1
150	30+A1
100	20

Таблица 5

Зависимость числа пробиваемых слоев ЭВТИ от параметров частиц

Ускорители взрывного типа		
Размер частиц, мкм	Число пробиваемых слоев	Скорость частиц, км·с ⁻¹
50	7	2,5
25	5	2,5
5	Не пробивается	2,5
50	12	4,5
25	7	4,5
5	Не пробивается	4,5

Из экспериментов следует, что уже при скорости 4,5 км·с⁻¹ частицы из железа диаметром 200 мкм пробивают 50 слоев ЭВТИ или 30 слоев и часть алюминиевого сплошного экрана.

Частицы с размерами 5 мкм и скоростью 2,5 км·с⁻¹ не пробивают ни одного слоя ЭВТИ (эксперименты с взрывным ускорителем).

Воздействие высокоскоростных частиц на оптическое стекло с напылением

Основными функциональными параметрами оптических материалов и элементов систем космических аппаратов, которые могут изменяться под воздействием мелкодисперсных частиц, являются их спектральные и интегральные коэффициенты направленного и диффузного пропускания и отражения, а также характеристики рассеяния [57].

В качестве объекта исследования использовано оптическое стекло марки К-8, на поверхность ко-

торого была нанесена пленка из платины толщиной 0,05 мкм. С помощью электродинамического ускорителя [13] объект был подвергнут воздействию потока из 14 000 частиц алюминия с характерным размером 0,5—3 мкм и скоростями 3—8 км/с.

Изменение спектрального коэффициента пропускания стекла, измеренное с помощью спектрофотометра, показано на рис. 11 [58].

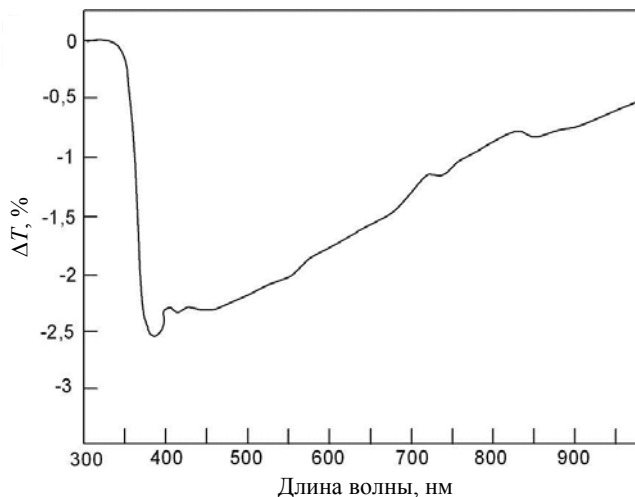


Рис. 11. Изменение спектрального коэффициента пропускания стекла ΔT (в процентах) в зависимости от длины волны

На изменение оптических характеристик влияет металлическое покрытие, которое значительно увеличивает разрушение за счет разгрузки ударно-сжатого вещества и отслоение от стекла.

Воздействие высокоскоростных частиц на солнечные батареи

Воздействие высокоскоростных частиц на солнечные батареи космического аппарата исследовалось также с помощью ускорителя [59—63].

Воздействие потока высокоскоростных частиц приводит к ухудшению оптических характеристик, в частности коэффициента пропускания солнечного излучения τ_{зп} защитных покрытий солнечной батареи. Снижение τ_{зп} приводит к уменьшению количества генерируемых носителей заряда и, соответственно, к уменьшению тока короткого замыкания J_{к.з.} Для измерения характеристик солнечной батареи используется экспериментальная установка, показанная на рис. 12.

Изменение тока и напряжения солнечной батареи относительно батареи в опорном канале, вызванное воздействием частиц размером 0,5—3 мкм и скоростями 1—8 км/с, показано на рис. 13. На графике видно, что ток короткого замыкания (I_{к.з.}) подвержен гораздо большей деградации, чем напряжение холостого хода (U_{х.х.}).

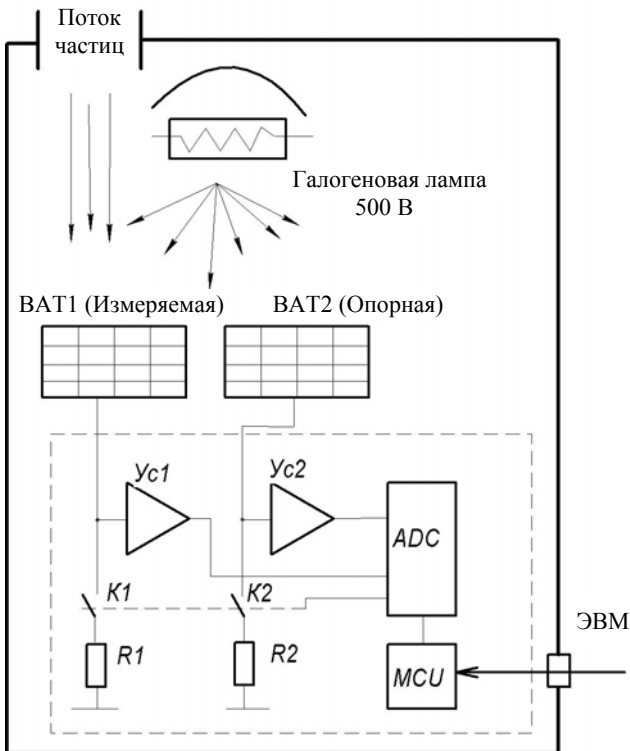


Рис. 12. Схема экспериментальной установки для определения деградации характеристик солнечных батарей

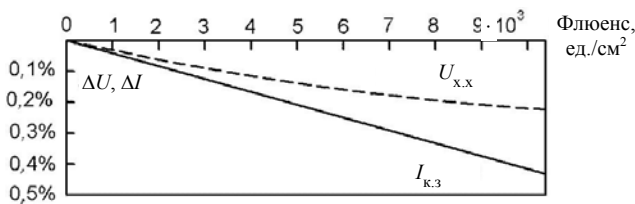


Рис. 13. Изменение электрических характеристик солнечных батарей под воздействием интегрального потока (флюенса) микродисперсных частиц

Заключение

Приведенные результаты исследования характеристик многослойных структур как элементов конструкции космических аппаратов в условиях воздействия высокоскоростных твердых частиц указывают на сложность и высокую стоимость применяемого экспериментального оборудования.

Большая номенклатура создаваемых новых материалов для космической техники и увеличение длительности их функционирования в космических условиях требует усовершенствования методик проведения лабораторных экспериментов, расширения диапазона частиц по массам и скоростям, более современной ускорительной техники.

Для проведения лабораторных исследований близких к натурным и выполнения более точного прогноза деградации элементов конструкции или их возможного пробоя необходимо совмещение ударных воздействий и воздействием других фак-

торов космической среды, например, электронов, протонов и ультрафиолета.

Работа выполнена в ходе научно-исследовательской работы в рамках реализации ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009–2013 гг. (ГК № П889 от 26 мая 2010 г.).

Литература

1. Мазжорин Д. А., Чекалин С. В. // Сб. "Проблемы космического мусора". — М.: Знание, 1991.
2. Дивари Н. Б. Пыль в атмосфере и околоземном космическом пространстве. — М.: Наука, 1973.
3. Масевич А. Г. Столкновение в околоземном пространстве (космический мусор): Сб. "Космоинформ", 1995.
4. Дикки Н. Р., Калп Р. Д. // *Аэрокосмическая техника*. 1990. № 19. С. 51.
5. Population Model of Small Size Space Debris, IFRR-TUBS, Darmstadt, 1993.
6. Лебединец В. П. Аэрозоль в верхней атмосфере и космическая пыль. — Л.: ИЭМ, 1981.
7. Fluri W. // *Earth Space Review*. 1995. V. 4. No. 3.
8. Фадеенко Н. Н. Высокоскоростной удар. Библиографический указатель отечественной и иностранной литературы. Новосибирск. Изд-во Ин-та гидродинамики, СО АН СССР, 1967. Вып. 3; 1979. Вып. 4.
9. Манзон. Б. М. // *УФН*. 1981. Т. 134. Вып. 4. С. 611.
10. Семкин Н. Д., Пияков А. В., Погудин А. П. // *Прикладная физика*. 2008. № 4. С. 153.
11. Николаевский В. И. Высокоскоростные ударные явления. — М.: Наука, 1973.
12. Маржиевский Л. А., Титов В. М., Фадеенко Ю. И. и др. // *Физика горения и взрыва*, 1987. Т. 23. № 5. С. 791.
13. Швецов Г. А., Титов В. М., Анисимов А. Г. и др. Докл. на IV Междунар. конф. по генерации мегагаусных магнитных полей и родственными экспериментам. — США. Санта-Фе. 14—17 июля 1986.
14. Швецов Г. А., Титов В. М., Анисимов А. Г. и др. Рельсотронные ускорители макрочастиц. Ч. 2. Общие характеристики: Докл. на IV Междунар. конф. по генерации мегагаусных магнитных полей и родственными экспериментам. — США. Санта-Фе. 14—17 июля 1986.
15. Семкин Н. Д., Пияков А. В., Воронов К. Е. и др. // *ПТЭ*. 2006. № 3. С. 154.
16. Бедняков А. А., Гиляров Р. А., Дзагуров О. Б. и др. // *ПТЭ*. 1998. № 2. С. 149.
17. Slattery J. C., Becker D. G., Hamermesh B. // *Rev. Sci. Instrum.* 1973. V. 44. No. 6. P. 755.
18. Семкин Н. Д., Пияков А. В., Воронов К. Е. и др. // *ПТЭ*. 2007. № 2. С. 140.
19. Семкин Н. Д., Пияков А. В., Воронов К. Е. и др. Ускоритель высокоскоростных пылевых частиц: Пат. на изобретение 2205525 РФ. Выдан в 2003. БИ 34.
20. Семкин Н. Д., Пияков А. В., Воронов К. Е. // *Авиакосмическое приборостроение*. 2003. № 7. С. 24.
21. Семкин Н. Д., Воронов К. Е., Пияков А. В. и др. // *ПТЭ*. 2009. № 4. С. 1.
22. Николаевский В. И. Высокоскоростные ударные явления. — М.: Мир, 1973.
23. Осташов В. Е., Лебедев Е. Ф., Фортвов В. Е. // *ТВТ*. 1993. Т. 31. № 2. С. 313.

25. Мерзиевский Л. А., Тутов В. М., Фадеенко Ю. И. и др. // ФГВ. 1987. № 5. С. 77.
26. Новиков С. А., Петров В. А. Установки взрывного типа для механических испытаний материалов и конструкций (обзор). — М.: ЦНИИ атоминформ, 1989.
27. Забабахин Е. И. Некоторые вопросы газодинамики взрыва. — Снежинск, ВНИИ ТФ, 1997.
28. Бурцев В. А., Калинин Н. В., Лучинский А. В. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. — М.: Энергоатомиздат, 1990.
29. Семкин Н. Д. // ФХОМ. 2002. № 6. С. 42.
30. Дьяков Б. Б., Резников Б. И. Электромагнитные рельсовые метателлы: состояние проблемы и элементарная теория. Препринт № 969. — Л.: Изд-во физ.-техн. института им. А. Ф. Иоффе, 1985.
31. Кацнельсон С. С., Загородский А. В. // ПМТФ. 2001. Т. 42. № 1. С. 13.
32. Сивков А. А. // Там же. С. 3.
33. Хоук Р. С., Брукс А. Л., Фаулер К. М. и др. // Аэрокосм. техн. 1983. Т. 1. № 2. С. 110.
34. Златин Н. А., Красильщиков А. П., Мишин и др. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях. — М.: Наука, 1974.
35. Златин Н. А. Физика быстропротекающих процессов. — М.: Мир, 1971. Т. 2.
36. Черный Г. Г., Чернявский С. Ю. Теоретические и экспериментальные исследования гиперзвуковых течений при обтекании тел и в следах. — М.: Изд-во МГУ, 1979.
37. Семкин Н. Д., Воронов К. Е., Новиков Л. С. и др. Источники заряженных полевых частиц: Пат. на изобретение 22242849; БИ № 35, 2004.
38. Семкин Н. Д., Шепелев С. М. // Вестник СГАУ. 2006. № 3. С. 44.
39. Семкин Н. Д., Воронов К. Е., Новиков Л. С. и др. // ПТЭ. 2005. № 2. С. 123.
40. Семкин Н. Д., Воронов К. Е. // ЖТФ. 1998. Т. 68. № 8. С. 63.
41. Pailer N., Kissel J., Schneider E. A. // Space Sci. Instr. 1978. V. 4. No. 1. P. 85.
42. Семкин Н. Д., Воронов К. Е., Боговявленский Н. Л. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 1. С. 88.
43. Семкин Н. Д., Воронов К. Е., Пияков А. В. и др. // Прикладная физика. 2009. № 1. С. 86.
44. Аскарян Г. А., Мороз Е. М. // ЖЭТФ. 1962. Т. 43. С. 2319.
45. Аскарян Г. А., Манзон Б. М. // Письма ЖЭТФ. 1978. Т. 27. С. 113.
46. Аскарян Г. А., Манзон Б. М. // Физ. плазмы. 1981. Т. 7. С. 155.
47. Витенберг Ф. В. Проблемы лазерного термоядерного синтеза. — М.: Атомиздат, 1976.
48. Семкин Н. Д. // Приборостроение. 1986. Т. XXIX. № 86. С. 60.
49. Семкин Н. Д., Воронов К. Е., Кондрашов В. Н. Исследование характеристик ионизационно-конденсаторного преобразователя пылевых частиц, полученных с помощью импульсного лазера. Препринт ТРИНИТИ-0040-А ЦНИИАТОМИНФОРМ, 1998.
50. Семкин Н. Д., Борисов Б. В. XXIX научно-техническая конференция. — Л.: ЛИАП, 1975. С. 26.
51. Semkin S. D., Voronov K. E., Novikov I. S. // ICPMSE-7, 2006, Toronto, Canada.
52. Семкин Н. Д., Изюмов М. В. // Вестник СГАУ. 2009. № 4 (20). С. 43.
53. Portnyagin Yu. J., Kluev O. F., Semkin N. D. The 23 wheeling of COSPAR. June—July, 1990. The Hague. The Netherlands.
54. Семкин Н. Д. // Космонавтика и экология: концепции и технические решения: Научно-практический семинар: Сб. тез. докл. — Туапсе, 1990.
55. Семкин Н. Д., Бай Юй. // Вестник СГАУ, серия: Актуальные проблемы радиоэлектроники. — Самара, 2001. Вып. 6. С. 42.
56. Семкин Н. Д. // Дискретные и цифровые методы в радиотехнических устройствах и системах. — Куйбышев, 1990. С. 87.
57. Портнягин Ю. И. Моделирование влияния факторов антропогенного загрязнения околоземного космического пространства на элементы конструкций и систем космических аппаратов. — М.: Гидрометеоздат, 1992.
58. Семкин Н. Д., Калаев М. П. // ПТЭ. 2011. № 1. С. 9.
59. Семкин Н. Д. и др. // ПТЭ. 2007. № 1. С. 35.
60. Семкин Н. Д., Телегин А. М., Изюмов М. В. // Прикладная физика. 2010. № 4. С. 131.
61. Novikov J. S., Voronov K. E., Semkin N. D. // Proc. Second European Conference on Space Debris, ESOC, Darmstadt, Germany 17—19 March, 1997.
62. Апату И., Васюкова З. В., Кацеев Б. Л. и др. // Космические исследования. 1981. Т. 19. Вып. 5. С. 700.
63. Drolshagen G., Svedhem H., Grun E. G. // Proceedings of the second European Conference on Space Debris, ESOC, Darmstadt, Germany, 17—19 March, 1997 (ESA SP-393, May, 1997).

Multilayer film structures under the influence of micrometeoroids and space debris

N. D. Semkin, M. P. Kalaev, A. M. Telegin, A. V. Pijakov, D. V. Rodin
S. P. Korolyov Samara State Aerospace University (National Research University)
34 Moskovskoe sh., Samara, 443086, Russia
E-mail: sgau5@yandex.ru

We describe the results of laboratory tests on high-speed particles flows influence on various multilayer structural elements of the spacecraft: capacitor sensors, thermal control coatings, heat pipes, optical coated glass and solar panels. We consider methods of experiments using a laser, electrostatic and explosive accelerator.

PACS: 07.87.+v

Keywords: electrostatic accelerator, laser accelerator, explosive accelerator micrometeoroid, the degradation of the surface, multilayer film structures.

Bibliography — 63 references.

Received May 14, 2011