

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЧАСТИЦ С ТЕРМОРЕГУЛИРУЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

© 2009 М. В. Изюмов¹, Н. Д. Семкин², М. П. Калаев²

¹ ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс»

² Самарский государственный аэрокосмический университет

Решается задача диагностики характеристик терморегулирующих элементов космических аппаратов (тепловые трубы и терморегулирующие покрытия). Рассмотрены результаты экспериментов по моделированию высокоскоростного взаимодействия частиц с тепловыми трубами и терморегулирующими покрытиями.

Высокотемпературные тепловые трубы, терморегулирующие покрытия, ускоритель частиц, солнечные отражатели, солнечные поглотители.

Введение

В процессе функционирования космического аппарата (КА) в условиях взаимодействия факторов космической среды наблюдаются изменения характеристик его элементов конструкций. Одним из важных факторов воздействия на КА является антропогенное загрязнение космического пространства, значительно превышающее потоки микрометеороидов. Вместе с тем систематические исследования в области оценки возможных последствий воздействия частиц на свойства внешних элементов КА к настоящему времени практически отсутствуют.

В работе:

1) рассмотрены вопросы диагностики характеристик высокотемпературных тепловых труб (ТТ) (контроль эксплуатационной герметичности и излучаемой мощности), а также модели взаимодействия высокоскоростной частицы с МДМП-структурой, являющейся частью стенки ТТ. Проведены эксперименты по моделированию высокоскоростного взаимодействия частиц с ТТ с помощью различных типов ускорителей;

2) приведены некоторые результаты, полученные в ходе исследований по лабораторному моделированию влияния потоков мелкодисперсных частиц на деградацию оптических характеристик (коэффициента поглощения солнечного излучения A_s и коэффициента излучения) терморегулирующих покрытий (ТРП) поверхностей систем терморегулирования КА.

1. Взаимодействие частиц с высокотемпературными тепловыми трубами

Для высокотемпературных тепловых труб (ТТ), как важных элементов конструкции КА или какой-либо энергетической установки, наибольшую опасность представляют пылевые частицы (техногенные частицы, микрометеориты), мелкая фракция которых вызывает изменение оптических характеристик, а более крупная фракция – разгерметизацию ТТ с последующим выходом теплоносителя в открытое пространство. Такие случаи представляются наиболее опасными в связи с загрязнением окружающей среды, например литием или натрием.

При высокоскоростном взаимодействии частицы со стенкой ТТ может произойти пробой МДМП-структуры, в результате которого ток утечки увеличивается на время закорачивания. Напряжение, подаваемое на структуру, восстанавливая ее при этом, устанавливает факт регистрации частицы. Если в результате повреждающего воздействия частицы на стенку ТТ произойдет ее разгерметизация, то это вызовет отклонение температуры стенки, а значит и температуры диэлектрика.

Схематичное строение тепловой трубы приведено на рис. 1.

С учетом зависимости тока утечки для конкретного диэлектрика (например, Al_2O_3) от температуры, а также его временной зависимости можно производить диагностику

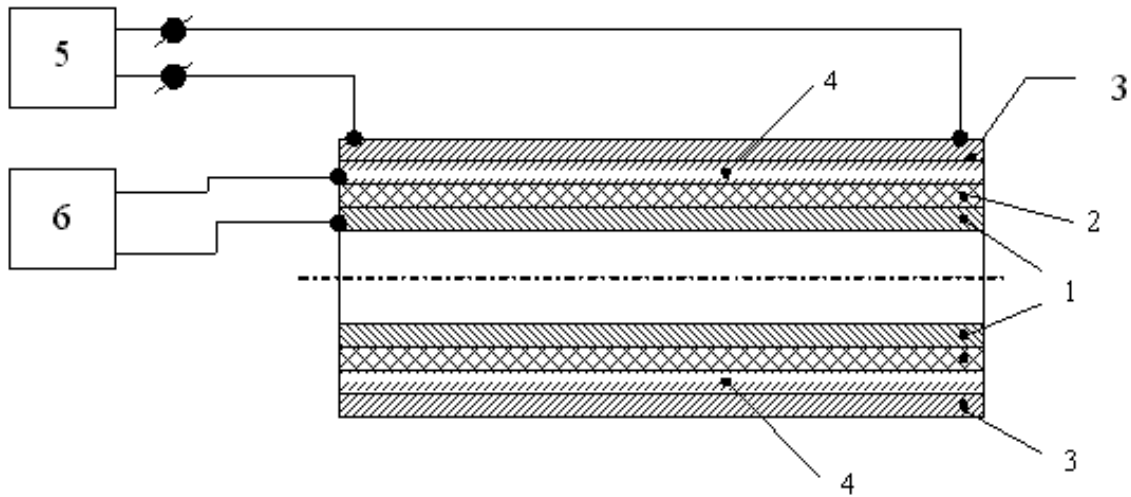


Рис. 1. Схематическое изображение тепловой трубы (ТТ)

1 - стенка ТТ (толщина $0,3 \pm 0,5$ мм, Nb), 2 - диэлектрик (Al_2O_3) - толщина 0,1 мм, 3 - чернотное покрытие (манганит лантана), толщина 0,1 мм, 4 - металлическая пленка (обкладка структуры металл-диэлектрик-металл, толщина 0,05 мм), 5 - измеритель мощности излучения, 6 - устройство контроля эксплуатационной герметичности, 1-4 - в общем случае МДМП- структура

характера повреждающего взаимодействия, а также иметь информацию о параметрах частицы. В соответствии с эквивалентной электрической схемой ТТ (рис. 2) получено выражение для сопротивления канала пробы МДМ-структуры (рис. 4) в виде

$$R_x = \frac{1}{2} \left[\frac{3U^a_{пр} R_{орп} R_d}{UR_d - (R_d - R_{орп})U^a_{пр}} - \frac{U^b_{пр} R_{орп} R_d}{UR_d - (R_d + R_{орп})U^b_{пр}} - R_{чп} \right], \quad (1)$$

где U - опорное напряжение, R_d - сопротивление диэлектрика, R - ограничивающее сопротивление, $R_{чп}$ - сопротивление чернотного покрытия – априори известные величины, $U^a_{пр}$, $U^b_{пр}$ - напряжения, определяемые во

время пробы с двух точек измерения: а и б (рис. 4).

При остывании ТТ в результате ее разгерметизации и выхода теплоносителя в окружающее пространство по изменению сопротивления резистивного слоя чернотного покрытия можно определить усредненную по поверхности ТТ малую мощность. Расчет мощности излучения производится по формуле Стефана-Больцмана.

Зависимости мощности излучения от величины тока для двух материалов приведены в таблице 1.

Рассмотрим модели взаимодействия высокоскоростной частицы с МДМ-структурой, являющейся частью стенки ТТ:

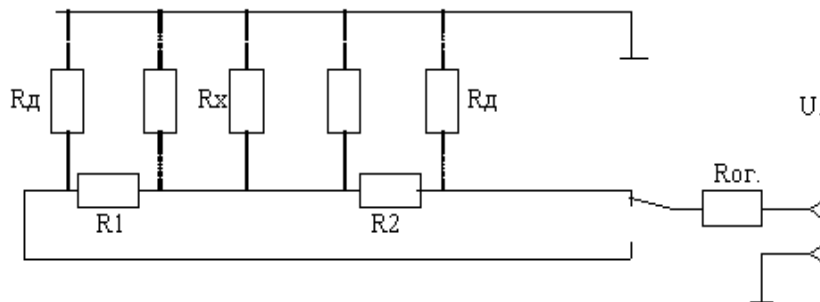


Рис. 2. Электрическая модель пробы МДМ-структуры

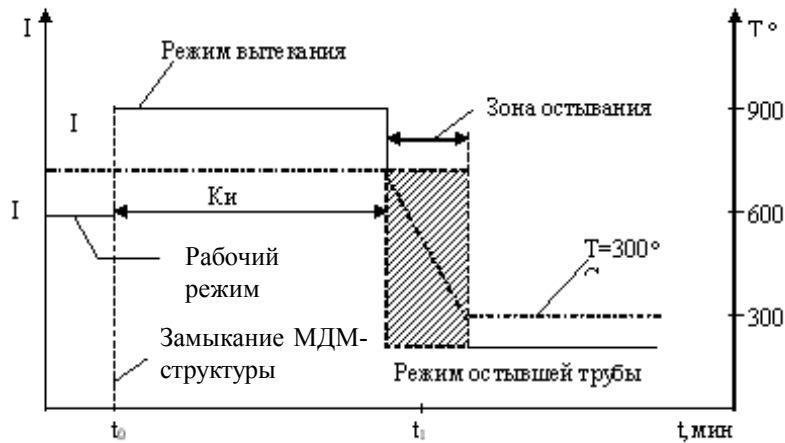


Рис. 3. Модель остывания ТТ с замкнутой МДМ-структурой

1. Образование кратера на внешней поверхности стенки ТТ (чернотного покрытия) без повреждения диэлектрика и внутренней металлической стенки.

2. Образование кратера в чернотном покрытии и диэлектрике без замыкания МДМ-структуры.

3. Образование кратера в МДМ-структуре с ее механическим замыканием без разгерметизации ТТ.

4. Сквозной пробой стенки ТТ с образованием отверстия.

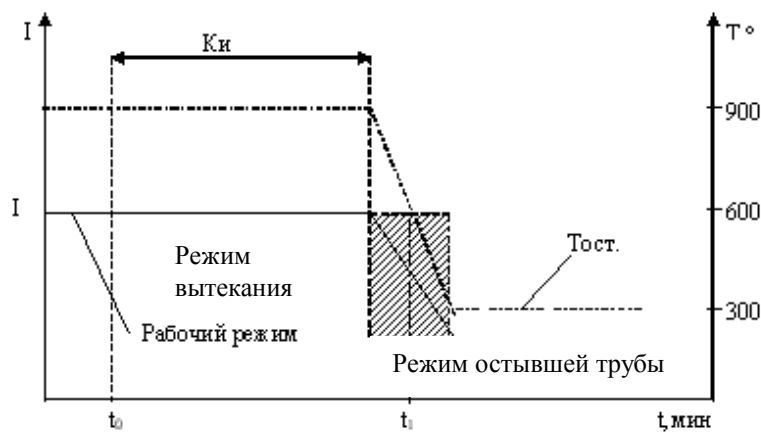
Первые три вида воздействия не приводят к нарушению режима работы ТТ.

Первые два случая менее важны с точки зрения эксплуатации трубы в натурных условиях, чем случай механического пробоя стенки ТТ.

Через образовавшееся отверстие происходит истечение теплоносителя, находящегося в жидком и газообразном виде. Предположим, что после пробивания стенки ТТ через время τ (время прохождения частицы через стенку ТТ) замкнутая МДМ-структура восстановится.

Из-за разности давлений теплоноситель в виде пара натрия (или жидкости) устремляется в образовавшееся отверстие. При этом необходимы следующие предположения:

1. Истечение пара происходит без конденсации его на стенках канала, так что МДМ-структура не закорачивается.
2. Истечение пара происходит до полного израсходования массы теплоносителя.
3. Тепловая труба остывает после ис-



б)

Рис. 4. Модель остывания ТТ с разомкнутой МДМ-структурой

Таблица 1. Зависимость мощности излучения от силы тока

T, °K	Q, Вт	Хромид лантана (предел измерения 1000 Ом)	Манганат лантана(предел измерения 20 Ом)
		I, мкА	I, мкА
700	468	63.7	48
800	798	50.6	51
900	1278	42.9	54
1000	1949	38.0	60
1100	2854	34.7	68
1200	3602	30,6	76

течения теплоносителя вследствие уменьшения теплоотдачи от источника тепла.

В соответствии с принятой моделью можно получить уравнение (2), связывающее время $\tau_{и}$ истечения теплоносителя, плотность потока пара и сечение отверстия $S_{отв}$:

$$\tau_{и} = \frac{M}{j \cdot S_{отв}}, \quad (2)$$

где M – масса теплоносителя, j – плотность потока пара. Если сечение отверстия принять равным $S_{отв} = 10^{-2} \text{ см}^2$, то $t_{и} \geq 2$ часа.

Оценим время остывания ТТ после истечения теплоносителя, считая поток от источника теплоты $q=0$. Тогда уравнение, описывающее остывание ТТ, будет иметь вид:

$$\frac{dCmT}{dt} = -\delta T^4 S, \quad (3)$$

где C – средняя теплоемкость стенки ТТ из ниобия, m – масса ниобия, S – площадь боковой поверхности. Начальное условие для уравнения (3) имеет вид:

при $t=0$, $T=1150 \text{ К}$.

Интегрированием (3) получим зависимость температуры остывания стенки ТТ:

$$T(t) = \frac{T_0}{\sqrt[3]{1 + \frac{3t}{t_0}}}, \quad (4)$$

где $t_0 = \frac{CmT_0}{\delta T_0^4 S}$ – характерное время остывания.

При остывании ТТ сопротивления $R_{чп}$ чернотного покрытия и $R_{д}$ диэлектрика (рис. 5) увеличиваются. На рис. 5 представлены экспериментальные зависимости токов проводимости $I_{чп}$ и $I_{д}$ диэлектрического и чернотного покрытия модели тепловой трубы как функции температуры.

Так как динамика изменения температуры во время истечения пара ($T=T_0=\text{const}$) и после истечения различны и $t_{и} \gg t_0$, то по скорости изменения тока проводимости

(утечки) МДМ-структуры от времени $\frac{dI_D}{dt}$

можно зафиксировать момент израсходования массы теплоносителя.

Начало процесса истечения определяется по факту замыкания-восстановления МДМ-структуры, а величина $S_{отв}$ оценивается по формуле (2).

Зная размер отверстия и используя модели сквозного пробивания тонких преград в виде МДМ-структуры, с учетом системы обработки определяются параметры высокоскоростной частицы.

Если истечение пара будет происходить с конденсацией на стенках канала отверстия, то этот процесс можно контролировать с помощью выжигания проводящей перемычки. Момент полного израсходования массы теплоносителя определяется по моменту исчезновения перемычки в отверстии стенки ТТ.

В этой модели также остается вероятность неполного истечения массы теплоносителя.

Третья модель предполагает затекание жидкого натрия из фитиля ТТ в образовав-

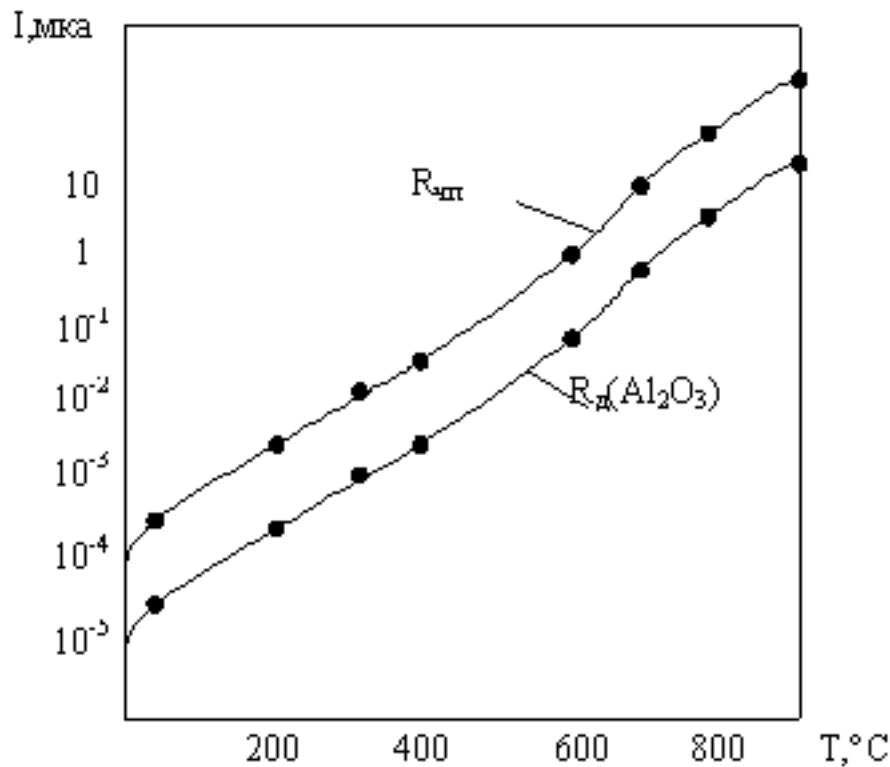


Рис. 5. Зависимости токов проводимости диэлектрического и чернотного покрытия тепловой трубы

шее отверстие. В этом случае возможна ситуация, при которой потребуются несколько большие пробивные напряжения для восстановления МДМ-структуры. Зная величину пробивного напряжения, с учетом соответствующей модели образования проводящей перемычки можно идентифицировать нарушение герметичности ТТ вследствие ее пробоя, а также восстановить информацию о размере отверстия.

Рассчитаем сопротивление диэлектрика МДМ-структуры в рабочем режиме функционирования ТТ ($T=900$ °C). Исходя из зависимости температуры ТТ по длине Z трубы $T=T(Z)$, удельной проводимости от температуры $\delta=\delta(T)$, суммарную проводимость всей ТТ определим из соотношения

$$G = \frac{2\pi r}{h} \int_0^h \delta(Z) dZ, \quad (5)$$

где r - радиус трубы, h - толщина диэлектрика ($h \ll T$). С учетом вышеуказанных зависимостей соотношение (4) преобразуется к виду:

$$G = \frac{2\pi r}{h} \int_{T_0}^T \frac{\delta(Z) dZ}{dT} dT. \quad (6)$$

Если $\delta=\text{const}=\delta_0$, то $G = \frac{2\pi r l \delta_0}{h}$, или $R = \frac{1}{G}$.

Оценим мощность электрической энергии, необходимой для выжигания закорачивающей перемычки:

$$P = \left(\frac{E}{R_{кз} + R_n} \right)^2 R_{кз}, \quad (7)$$

где R_n - сопротивление нагрузки, $R_{кз}$ - сопротивление короткозамкнутой перемычки.

Для испарения массы m теплоносителя необходима энергия:

$$E_{\text{исп}} = cm(T_{\text{исп}} - T) + qm, \quad (8)$$

где c - массовая теплоемкость, q - теплота парообразования.

Эксперименты по пробиванию стенки ТТ в виде МДМ-структуры проводились с помощью электромагнитного ускорителя частицами в форме проводников $\varnothing 0,2$ мм и

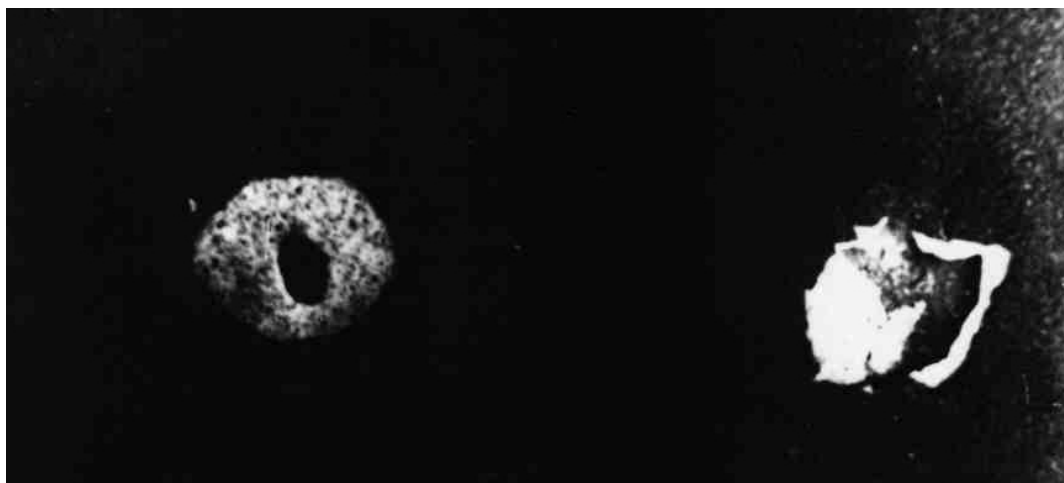


Рис. 6. Случаи образования кратера (слева) и сквозного пробивания (справа)

$l=3$ мм. Для тепловой трубы, имеющей стенку из ниобия толщиной 0,3 мм и слой диэлектрика из окиси алюминия толщиной 0,1 мм с нанесенным на него чернотным покрытием $h=0,1$ мм из шпинели, определена для частицы указанных размеров пробиваемая скорость, составляющая $\sim 5,3$ км/с. На рис. 6 показаны случаи образования кратера (слева) и сквозного пробивания (справа). Наблюдается откол чернотного покрытия на значительной площади при выходе волны разгрузки на поверхность ТТ. Для стенки ТТ, нагретой до $T=900$ °С, предельное значение пробиваемой скорости частицы уменьшается до $4,8$ кмс⁻¹.

Влияние потоков мелкодисперсных частиц на оптические характеристики ТТ экспериментально изучено с помощью ускорителя взрывного типа [2], а также электростатического ускорителя в диапазоне масс $5 \cdot 10^{-9} \div 10^{-13}$ грамм [1]. Материал частиц: графит, сажа, Al_2O_3 , Al, TiC, Fe, W. Диапазон частиц по скоростям – $1,5 \div 8$ кмс⁻¹. Величина плотности потока частиц в экспериментах с взрывным ускорителем находилась в пределах $0,1 \div 0,65$ гм⁻². В экспериментах с электростатическим ускорителем суммарная величина плотности потока частиц имела такую же величину. Результаты экспериментов показывают, что коэффициент поглощения A_s значительно увеличивается с 0,15 до $0,43 \div 0,6$, а коэффициент черноты E изменяется незначительно с 0,9 до 0,92. В экспериментах в качестве чернотных покрытий на

ТТ использовались манганит лантана, хромид лантана и шпинель.

Теоретическое и экспериментальное исследования характеристик тепловой трубы в условиях воздействия высокоскоростных частиц позволяет сделать следующие выводы:

1. Коэффициент поглощения A_s значительно увеличивается с 0,15 до 0,6 при воздействии потока частиц $0,1 \div 0,65$ гм⁻², эквивалентного воздействию частиц с массами $10^{-12} \div 10^{-9}$ грамм и скоростями $1 \div 30$ кмс⁻¹ в космических условиях в течение времени, приблизительно равного 2-2,5 годам. Расчеты проведены в соответствии с [1].

2. Проведенные исследования показывают возможность контроля герметичности и излучаемой мощности ТТ в представлении ее как распределенной RC-структуры путем измерения токов проводимости чернотного покрытия и МДМ-структуры и указывают на перспективы практического использования рассматриваемых методов контроля в натуральных условиях.

2. Взаимодействие частиц с терморегулирующими покрытиями (ТРП)

Использование в лабораторных экспериментах электростатических ускорителей и генераторов взрывного типа для создания потоков частиц на основе конденсированных взрывчатых веществ позволило исследовать эффекты взаимодействия частиц с терморегулирующими покрытиями (ТРП) различно-

го типа в диапазоне скоростей соударения $0,5 \div 10 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$. В качестве частиц использовались порошки различных металлов и их соединений с размерами от 1 до 50 мкм. Исследования проводились в вакуумных камерах при остаточных давлениях $10^{-2} \div 10^{-4} \text{ мм.рт.ст.}$ и $10^{-5} \text{ мм.рт.ст.}$ (в случае электростатического ускорения).

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

В качестве количественных характеристик воздействия потока частиц на ТПР использована удельная кинетическая энергия:

$$E_{y0} = \rho_F V_{cp}^2 / 2, \quad (9)$$

где V_{cp}^2 – 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 ТПР осуществлялось до и после ударных экспериментов. Для определения интегральных значений As использовались фотометры, для ϵ – терморadiометры с диапазонами спектральной чувствительности от 0,3 до 2,4 мкм и от 4 до 40 мкм соответствен-

но. Основными задачами экспериментов являлось определение характера взаимодействия частиц с ТПР и оценка изменений As и ϵ в зависимости от параметров потока частиц и их материалов, а также параметров деградации.

Так, с помощью ускорителя взрывного типа можно получить на поверхности ТПР пленочное покрытие островковой структуры. Воздействия низкоскоростных и высокоскоростных частиц, внедряющихся в материал покрытия, а также пылинки, оседающие на поверхность ТПР после окончания взрывных процессов, приводят к изменению их оптических характеристик. Ниже рассматриваются эксперименты по облучению частицами ТПР с помощью ускорителя взрывного типа. С помощью взрывного ускорителя частицы имеют скорости $0,1 \dots 7 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ и массы $10^{-8} \div 10^{-12} \text{ г}$.

Источник частиц 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 1-30 мкм. Результаты экспериментов помещены в таблице 2. Масса таблетки из гексогена составляла 9 граммов. Количество частиц на 1 см^2 лежало в пределах $10^2 \div 5 \cdot 10^3$ в зависимости от их размеров. Количество частиц определялось с помощью алюминиевой фольги толщиной 20 - 30 мкм, установ-

Таблица 2. Оптические характеристики ТПР

образец	Анодноокисное покрытие				чёрное		ЭМ - 40		МСН - 7	
ϵ_0	0,86	0,84	0,85	0,85	0,94	0,94				
ϵ	0,877	0,862	0,843	0,84	0,94	0,94	0,92	0,90	0,87	0,85
AS_0	0,2	0,19	0,19	0,19			0,15	0,15		
AS_1	0,717	0,73	0,717	0,73	0,038	0,038	0,43	0,43	0,65	0,69
Sb %	0,8	0,2	0,26	0,28	0,26	-	0,33	0,45	0,7	0,4
S_H %	0,13	0,4	0,26	0,26	0,22	-	0,17	0,16	1,9	1,1
Sn %	9	7	9	9	9	-	9	9	9	9
S_C %	1	1	1	1	1	-	1	1	1	1

ленной на одной линии с исследуемыми покрытиями, в непосредственной близости от них. Количество частиц на 1 см^2 (с учетом их распределения по скоростям) пересчитывалось на поток $n \cdot \vec{V}$.

Получение потока частиц с помощью взрывного метода ускорения довольно прост, хотя требует мощной вакуумной камеры и осторожности при работе с взрывчатыми веществами. Недостатком является возможность осаждения тончайшей пленки материала взрывчатого вещества. Чистый ударный эксперимент можно реализовать с помощью тонкой (5...10 мкм) алюминиевой фольги, загораживающей исследуемые покрытия. При этом скорость частиц при пробое ими фольги практически не уменьшается, если их размеры больше в 2-3 раза толщины фольги.

Заряд: 9 гр, тетрил + 0,5 гр вольфрамовых частиц, вакуум: $1,2 \cdot 10^{-2}$ мм.рт.ст., скорость начала фронта частиц: 1,2 км/с, база: 1,8 м, плотность потока частиц: $0,7 \cdot 10^6$ част/см²·сек.

Заряд: 9 гр тетрил + 0,5 гр вольфрамовых частиц, вакуум: $5 \cdot 10^{-3}$ мм. рт.ст.; экран: 5 мкм; скорость начала фронта частиц: 2,2 км/с⁻¹; база: 1 м; плотность потока частиц: $1,3 \cdot 10^6$ част/см²сек.

Исследование терморегулирующих покрытий после облучения частицами проводилось с помощью оптического микроскопа МИМ-8А, а также электронного микроскопа типа РЭМ-100У.

С помощью электронного и оптического микроскопов исследовались анодноокисные покрытия, покрытия типа МСН-7. Покрытия черные анодноокисные, 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, 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.

Проведенные оптические исследования позволили оценить площадь кратеров от высокоскоростных и низкоскоростных частиц. Увеличение для анодноокисных покрытий и МСН-7 составляло 320.

Производилось фотографирование 6-10 произвольно выбранных участков поверхности ТРП с общей площадью $(7-9) \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$, затем подсчитывалась общая площадь низкоскоростных и высокоскоростных кратеров отдельно. Все кратеры, размеры которых меньше минимального размера частицы, являются продуктом сгорания взрывчатого вещества, то есть кратерами от частиц сажи. При исследовании покрытия ЭМ-40 увеличение устанавливалось равным 60, и по всей площади образца вычислялась площадь кратеров.

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.

Обозначения в таблице следующие: ε - исходный коэффициент черноты; ε_1 - 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_H (%) - площадь кратеров от низкоскоростных частиц; S_n (%) - площадь, занятая пылью по отношению к площади образца; S_C (%) - площадь кратеров от сажи.

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

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

Для анодноокисных покрытий коэффициент поглощения при общей площади кратеров, составляющей 0,2 % от общей пло-

щади 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 крошки кратера.

Для покрытий ЭМ-40 и МСН-7 площадь кратеров возрастает на порядок при увеличении скорости фронта частиц примерно в два раза. Но при этом возрастает и количество крупных частиц, вызывающих увеличение кратеров. На рис. 7 и 8 показаны кратеры, образованные соударением вольфрамовых частиц размером 5 мкм и скоростью 2,2 км·с⁻¹ ($\times 1500$, покрытие МСН-7 и черное).

Таким образом, если иметь в виду эксперимент с источником взрывного типа, то можно говорить о воздействии очень мелких частиц (продуктов взрыва), высокоскоростных и низкоскоростных частиц как основного объекта воздействия и пыли, оседающей на образцы покрытий после взрыва. Другими словами, воздействие на исследуемые образцы покрытий в случае взрывного источника является сложным, так что выделение из общего потока только нужных нам

частиц является сложной задачей. Необходимо отметить, что исследование характеристик A_s и ϵ образцов покрытий как функций трех составляющих является само по себе интересной с практической точки зрения задачей. Получение “чистого” потока частиц (без сопутствующих загрязняющих веществ) требует другого ускорителя, на что и направлены в настоящее время основные усилия.

Другим источником пылевых частиц является электростатический ускоритель, который совместно с инжектором успешно используется в экспериментах по моделированию микрометеоритной пыли. Такой ускоритель является сложным устройством. Однако такой ускоритель является самым “чистым” из всех существующих типов и самым удобным инструментом. Контроль параметров частиц может осуществляться индивидуально при высокой степени разрежения.

Эксперименты с ТРП выполнены с помощью каскадного ускорителя с ускоряющим напряжением 200 кВ и ускорителя Ван де Графа с ускоряющим напряжением 1,5 МВ. При этом частицы с массами 10^{-13} – 10^{-11} грамма ускорялись до скоростей $10 \div 12$ км·с⁻¹ [1, 2]. Материал частиц – Fe, Al, Al₂O₃ и SiO₂.

Результаты экспериментов приведены в таблице 3. Общее количество частиц, взаимодействующее с ТРП, составило $\sim 10^4 \div 5 \cdot 10^4$.

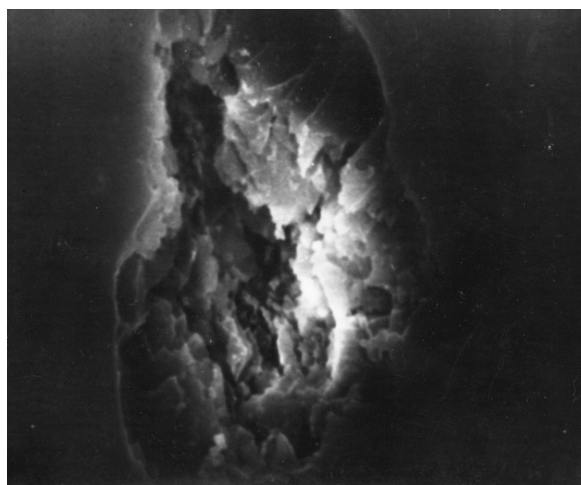


Рис. 7. Кратер от соударения вольфрамовой частицы размером 5 мкм и скоростью 2,2 км·с⁻¹ ($\times 1500$, покрытие МСН-7)

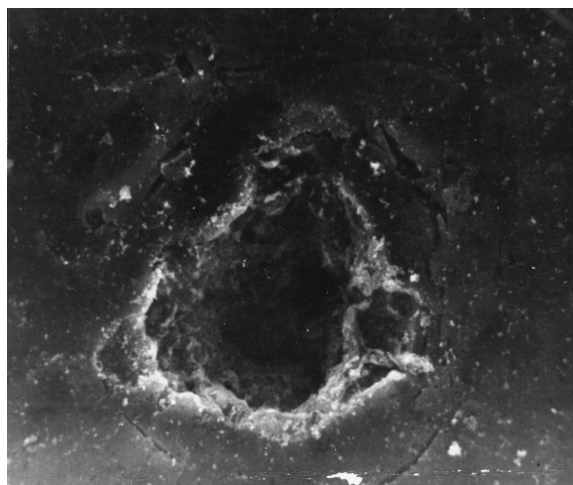


Рис. 8. Кратер от соударения вольфрамовой частицы размером 5 мкм и скоростью 2,2 км·с⁻¹ ($\times 1500$, покрытие черное)

Таблица 3. Результаты экспериментов с электростатическим источником частиц

1	⊥	6	10^{-5}	Fe (0,1 мкм)	~5...6	0,15	0,37	0,9	0,91	0,90 0,89 0,90
2	⊥	7	10^{-5}	Al (0,5...1 мкм)	~3...4	0,15	0,31	0,9	0,9	0,89 0,89 0,91

Материал покрытия ТРП – ZrO_2 . Эксперименты показали, что коэффициент поглощения возрастает с 0,15 до $0,37 \div 0,41$, а коэффициент черноты ϵ изменяется незначительно.

Недостатком электростатического ускорителя при проведении экспериментов с ТРП является невозможность экспонирования одновременно нескольких образцов в связи с тем, что максимальная облучаемая площадь мишени не превышает 10 см^2 . 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. При этом необходимо использовать экспериментальные данные о параметрах кратеров при высокоскоростном взаимодействии (зависимости размеров от скорости и массы частицы) и распределении величин потоков микрометеороидных и техногенных частиц в околоземном космическом пространстве. Таким образом можно получить приближенную картину эволюции коэффициентов A_s и ϵ ТРП в условиях эксплуатации КА.

Большинство типов ТРП представляют собой многослойные структуры. Характер взаимодействия высокоскоростных частиц с такими материалами отличается от изученных механизмов соударения твердых тел с тонкими однослойными или полубесконечными преградами. Характер и параметры образующихся в результате соударения дефектов в значительной мере зависят от соотношения размеров частиц и толщины, количества и последовательности слоев ТРП, а также от его физико-механических параметров. Экспериментально установлено, что для исследованных типов ТРП наиболее ти-

пичны два механизма взаимодействия с частицами – гидравлический и откольный.

Первый механизм наблюдался в экспериментах с ТРП из пластичных материалов – металлов. В этих случаях образуются кратеры классической формы и оказываются справедливы соотношения, описывающие взаимодействие высокоскоростных частиц с полубесконечной преградой. Диаметр кратера при этом в $1,5 \div 2$ раза превышает размер частицы. Увеличение скорости частицы в диапазоне от 1 до $10 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ приводит к увеличению глубины дефекта.

В результате экспериментов установлено, что величина уноса массы при пробивании частицами образцов ТРП в виде тонких металлических фольг и полимерных пленок со слоями металлов при толщине образца до нескольких десятков микрон составляет несколько процентов. Образовавшиеся в материале сквозные отверстия наблюдаются при помощи микроскопа, а у них на стороне, противоположной подвергавшейся воздействию частиц, имеется характерный рваный венчик, более ярко выраженный у металлических фольг и менее заметный у полимеров.

Наиболее чувствительными к механическому воздействию частиц является ТРП с хрупкими поверхностными слоями. Наиболее типичным дефектом является скол слоя краски в месте удара частицы. Скол имеет форму круга с центром в точке удара и незначительное повреждение материала подложки, причем диаметр откола в несколько раз превышал диаметр частицы уже при скоростях $3 \div 5 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$.

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. Таким образом, изменение оптических характеристик ТРП обус-

ловлено следующими физическими процессами: изменение шероховатости поверхности ТРП вследствие образования на ней кратеров от высокоскоростных частиц; обнажение поверхности подложки ТРП в результате откола этого покрытия в месте удара.

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 и 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 оптических свойств в первом приближении может описываться соотношением вида

$$K_p = 1 - (1 - K^\infty) \exp(-(1 - K^\infty)K_s), \quad (10)$$

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

Обобщение экспериментальных данных позволяет сделать вывод о том, что терморегулирующие покрытия классов солнечных и истинных отражателей и солнечных поглотителей стремятся в результате взаимодействия приобрести свойства истинных поглотителей. Общий характер изменения этих оптических характеристик исследованных классов ТРП при воздействии на них потоков частиц в указанном диапазоне скоростей показан на рис. 9???. Для истинных поглотителей характерно выполнение соотношения $\Delta A_s > \Delta \epsilon$. У солнечных поглотителей исходные значения A_s реальных образцов отличаются от единицы и составляют $\sim 0,65 \div 0,8$. Выявленные направления изменения оптических характеристик, обусловленные физикой процессов взаимодействия ча-

стиц с ТРП различных типов, позволяют обоснованно задавать исходные данные по деградации A_s и ϵ при исследовании последствий воздействия мелкодисперсных частиц на тепловой режим КА и исключать из рассмотрения заведомо невозможные их флуктуации.

Необходимо отметить, что под предельным в данном случае понимается такое значение оптических параметров ТРП, которое соответствует 100 % повреждению поверхности частицами. Эксперименты показали, что предельные значения A_s и ϵ большинства типов ТРП оказались равными $A_s^\infty = 0,8 \div 0,95$; $\epsilon^\infty = 0,65 \div 0,9$ и что наибольшей устойчивостью к воздействию такого рода обладают ТРП класса истинных поглотителей типа анодно-оксидированного алюминиевого сплава АМг-6. Для этого типа материалов предельные значения оптических параметров оказались практически равными исходным – $A_s^\infty = A_s^0$; $\epsilon^\infty = \epsilon^0$. Для истинных поглотителей, изготовленных путем нанесения на металлическую подложку эмалей и красок, наблюдалось уменьшение ϵ , обусловленное сколами красочного покрытия и обнажением поверхности подложки со своими (близкими к истинным отражателям) оптическими характеристиками. При проведении экспериментов практически ни у одного типа ТРП (всех четырех классов) не обнаружено снижения A_s при воздействии на образцы высокоскоростных частиц.

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что характер зависимости изменений оптических параметров различных классов ТРП от суммарной кинетической энергии воздействующих частиц адекватно описывается выражениями типа (9). Зависимость интегрального коэффициента поглощения солнечного излучения от $E_{уд}$ у солнечных и истинных отражателей наилучшим образом описывается уравнением

$$A_s = A_s^0 + (A_s^\infty - A_s^0)(1 - \exp(-KE_{y0})) \%, \quad (11)$$

при этом экспериментально определенные значения параметра модели (11) составляли $K = (5-6) \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{Дж}$ для солнечных отражате-

лей и $K=(3-5) \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{Дж}$ для истинных отражателей. Установлено, что для ТРП классов истинных и солнечных поглотителей выполняется условие $A_s \approx A_s^0 \approx A_s^{00}$.

Изменение интегрального коэффициента излучения под действием потока высокоскоростных МДЧ у истинных отражателей и солнечных поглотителей описывается уравнением

$$\varepsilon = \varepsilon^0 + (\varepsilon^\infty - \varepsilon^0)(1 - \exp(-KE_{y0})) \%, \quad (12)$$

а коэффициент K имеет значение порядка $3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{Дж}$. У истинных поглотителей и солнечных отражателей изменение ε либо не происходит, либо оно обусловлено сколом верхнего слоя покрытия. Изменение ε для них в первом случае описывается соотношением

$$\varepsilon^0 \approx \varepsilon^\infty,$$

во втором –

$$\varepsilon = \varepsilon^\infty + (\varepsilon^0 - \varepsilon^\infty)(1 - \exp(-1/BE_{y0})) \%, \quad (13)$$

и коэффициент B имеет величину порядка $1 \times 10^{-5} \text{ м}^2/\text{Дж}$.

Относительно входящих в выражения (12) и (13) параметров K и B можно заметить, что помимо типа ТРП их значение определяется также физическими свойствами и геометрическими параметрами частиц. Определение конкретного вида таких зависимостей требует самостоятельного исследования.

Приведенные на рис. 9 кривые демонстрируют зависимость коэффициентов деградации оптических параметров ТРП от степени повреждения поверхности, полученные по формуле (10) с использованием экспериментальных данных оценок параметров взаимодействия и деградации.

Результаты проведенных экспериментальных исследований по моделированию деградации оптических свойств различных типов ТРП под воздействием высокоскоростных мелкодисперсных компонентов АЗ ОКП показали, что эти параметры для большинства из числа испытанных типов ТРП чувствительны к такого рода воздействию. Направление изменения этих свойств при такого рода воздействии в основном определяется параметрами материала ТРП и скоростью удара частицы. Изменение оптических свойств поверхностей носит нелинейный характер, при малых величинах потоков его можно считать пропорциональным доле площади поверхности образца, поврежденной в результате взаимодействия с МДЧ. Определено, что наиболее устойчивыми являются ТРП на основе пластичных материалов – металлические и металл-полимерные, наименее устойчивыми – покрытия на стеклянной основе и со слоями красок. Показано, что механическое разрушение материала в последнем случае происходит в основном по поверхности адгезии и значительно возрастает при наличии скрытых локальных нарушений адгезионного слоя.

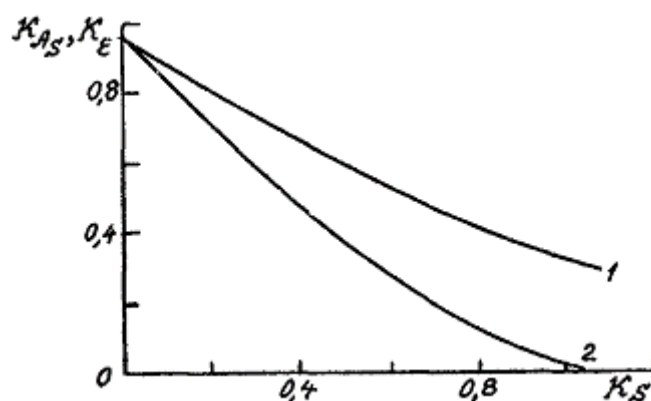


Рис. 9. Зависимость коэффициентов изменения оптических параметров ТРП (эмаль на Амг-6) от степени дефективности поверхности: 1 - K_{As} белой эмали, 2 - K_E черной эмали

Следует отметить, что при увеличении уровня загрязнения ОКП мелкодисперсными частицами деградация оптических характеристик ТРП под их воздействием может превысить уровни деградации, обусловленные естественными факторами. Это говорит о необходимости учета влияния АЗ на внешние элементы систем при разработке перспективных КА, особенно о длительном времени активного функционирования. Для этого требуются результаты не только лабораторных, но и натурных экспериментов, а также модель динамики АЗ ОКП и эволюции его компонентов. Наличие таких моделей в совокупности с результатами исследований по взаимодействию компонентов АЗ с конструкционными материалами КА позволит прогнозировать поведение элементов и систем КА при длительном функционировании в условиях роста уровня загрязнения и вести поиск средств и методов снижения темпов деградации функциональных параметров элементов систем. Рассмотренные и измеренные потоки частиц естественного (микрометеороидов) и искусственного происхождения (техногенных частиц), а также экспериментальные данные показывают увеличение коэффициента поглощения A_s приблизительно в 2 раза (при величине измеренного потока микрометеороидов, приведенного в [3]), то есть при $F = 0,25 \cdot 10^6 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ для частиц $\sim \varnothing 1 \div 3$ мкм. Согласно данным [4], за один год функционирования КА на 1 м^2 его внешней поверхности может воздействовать поток частиц $\sim (0,05 \div 0,25) 10^6 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ в зависимости от параметров орбиты, времени года и т.д., при котором A_s увеличивается \sim в 1,5–2 раза. Полученные в результате проведенных исследований результаты могут быть использованы при математическом моделировании процесса функционирования систем терморегулирования для решения задач анализа влия-

ния микрометеороидных и техногенных частиц околоземного космического пространства на нарушение теплового режима КА.

Библиографический список

1. Семкин Н. Д. Эрозионные процессы на поверхности терморегулирующих покрытий, облученных потоками высокоскоростных частиц / Научно-практический семинар // Космонавтика и экология: концепции и технические решения: Сб. тез. докл. – Туапсе, 1990. – С. 42.
2. Семкин Н. Д., Бай Юй. Взаимодействие высокоскоростных частиц с терморегулирующими покрытиями // Физика и химия обработки материалов. Выпуск 6. – Москва, 2002. – С. 42–48.
3. Пыль в атмосфере и околоземном космическом пространстве / Материалы научных съездов и конференций. – М.: Наука, 1973. – 311 с.
4. Столкновения в околоземном пространстве (космический мусор). Сб. научн. трудов / Под ред. Масевича А. Г. – Космоинформ, 1995.

References

1. Semkin N.D. Surface erosion of thermostatic coatings exposed to high-speed particle fluxes. Theoretical and practical workshop // Space exploration and ecology: concepts and engineering solutions: Collected abstracts. Tuapse. 1990 – p.42.
2. Semkin N.D., Bai Jui. Interaction of high-speed particles with thermostatic coatings. // Physics and chemistry of material processing. Issue 6. Moscow, 2002. pp. 42-48.
3. Dust in atmosphere and near space. Recordings of scientific congresses and conferences. M.: Nauka, 1973. – 311 pages.
4. Collisions in near space (space debris). Collected papers / edited by Masevich A.G.: Kosmoinform, 1995.

INTERACTION OF HIGH-SPEED PARTICLES AND TEMPERATURE CONTROL ELEMENTS OF A SPACE VEHICLE© 2009 M. V. Izyumov¹, N. D. Syomkin², M. P. Kalayev²¹Samara Space Rocket Centre “TsSKB-Progress”²Samara State Aerospace University

The paper deals with the problem of diagnostics of temperature control elements of space vehicles (heat pipes and temperature control coatings). The results of experiments on simulating high-speed particle interaction with heat pipes and temperature control coatings are discussed.

High-temperature heat pipes, temperature control coatings, particle accelerator, solar power reflectors, solar power absorbers.

Информация об авторах

Изыумов Михаил Владимирович, начальник сектора, ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс». Область научных интересов: аэрокосмическое приборостроение, космические исследования. E-mail: izumov_mike.csdb@mail.ru.

Семкин Николай Данилович, профессор, доктор технических наук, Самарский государственный аэрокосмический университет. Область научных интересов: аэрокосмическое приборостроение, космические исследования. E-mail: semkin@ssau.ru.

Калаев Михаил Павлович, инженер, Самарский государственный аэрокосмический университет. Область научных интересов: аэрокосмическое приборостроение, космические исследования. E-mail: semkin@ssau.ru.

Izyumov, Mikhail Vladimirovitch, head of sector, Samara Space Rocket Centre “TsSKB-Progress”. Area of research: aerospace instrument engineering, space research. E-mail: izumov_mike.csdb@mail.ru.

Syomkin, Nikolay Danilovitch, professor, doctor of technical science, Samara State Aerospace University. Area of research: aerospace instrument engineering, space research. E-mail: semkin@ssau.ru.

Kalayev, Mikhail Pavlovitch, engineer, Samara State Aerospace University. Area of research: aerospace instrument engineering, space research. E-mail: semkin@ssau.ru.