

УДК 535.361.2

**В. П. Бородулин**  
**Н. И. Карпов**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ  
ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ  
ТЕРМОРЕГУЛИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ  
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ  
ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ  
КОРПУСКУЛЯРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Приводится модель терморегулирующего покрытия эмалево-керамического типа, поврежденного воздействием потоков заряженных частиц, и предлагается методика расчета изменения отражательных свойств покрытий. В работе обсуждены границы применимости и ошибки предложенного метода. Сделаны выводы о возможности расчета поведения спектральной отражательной способности терморегулирующих покрытий в процессе их лабораторных и натуральных испытаний.

Терморегулирующие покрытия (ТРП), наносимые на внешние поверхности космических аппаратов, предназначены для поддержания определенного теплового режима космического корабля за счет установления баланса между тепловыделением внутри корабля, энергией, поглощаемой им из космоса, и энергией, переизлученной в космическое пространство.

Наибольшее распространение получили лакокрасочные эмалевые и керамические терморегулирующие покрытия. Такие покрытия, как правило, состоят из порошков окислов или солей металлов и органических или неорганических пленкообразующих связующих [1]. Так как их оптические свойства (интегральный коэффициент поглощения  $A_s$  и степень черноты  $\epsilon$ ) определяют установившийся тепловой режим космического аппарата, то стабильность этих свойств в течение всего времени функционирования изделия является основным критерием применения тех или иных покрытий.

Интегральный коэффициент поглощения солнечного излучения  $A_s$  данного эмалево-керамического покрытия, представляющего собой мутную многократно рассеивающую среду, зависит от спектральных показателей преломления и поглощения пигмента и связующего, а также от технологии приготовления и нанесения покрытия. Широкое распространение в качестве пигментов ТРП получили  $TiO_2$  и  $ZnO$ . Наилучшие отражательные свойства покрытий на основе этих пигментов достигаются при размерах рассеивающих частиц  $0,3 \div 0,5$  мкм при соотношении: одна часть связующего на несколько частей пигмента [1, 2].

Известно [3, 4], что в процессе эксплуатации ТРП под действием факторов космического пространства происходит увеличение их поглощательной способности.

Изменение степени черноты  $\epsilon$  здесь рассматривать не будем, так как воздействие факторов космического пространства на покрытия данного типа не приводит к заметным изменениям их величины  $\epsilon$  в области теплового излучения космического аппарата.

К увеличению поглощательной способности ТРП в космосе в основном приводит [4] загрязнение поверхности ТРП собственной ат-

мосферой космического аппарата (отработанные газы двигателей, продукты дегазации и распыления конструкционных материалов и т. п.), а также увеличение концентрации центров поглощения оптического излучения в объеме покрытия при его облучении электромагнитным излучением Солнца и корпускулярными потоками радиационных поясов Земли, солнечным ветром, космическими лучами.

Каждый из указанных факторов специфически воздействует на ТРП, изменяя его оптические параметры, что приводит к изменению характера взаимодействия покрытия с падающим на него светом.

Загрязнение ТРП может приводить к появлению слоя инородного вещества на поверхности покрытия как без существенного изменения его рельефа; так и к его изменению.

Воздействие ультрафиолетового и низкоэнергетического корпускулярного излучений, проникающих на 1—2 длины волны ( $\approx 0,5$  мкм) в покрытие на основе  $ZnO$  и  $TiO_2$ , должно приводить к изменению оптических параметров вещества ТРП только в этом слое.

Эти воздействия в свою очередь приводят к изменению «поверхностного» компонента [5], отраженного покрытием излучения. Изменение рельефа поверхности должно приводить только к изменению коэффициента зеркальности шероховатой поверхности покрытия [6],<sup>1</sup> а изменение параметров вещества в поверхностном слое ТРП под действием ультрафиолетового и корпускулярного излучений — к изменению как зеркальной, так и диффузной составляющих поверхностного отражения.

Воздействие корпускулярных потоков более высоких энергий приводит к глубинному характеру повреждений ТРП. Так как повреждающая способность и плотность потоков протонов в околоземном космическом пространстве выше, чем электронов [7, 8], то основным фактором, приводящим к глубинным повреждениям ТРП в процессе их эксплуатации, можно считать воздействие протонов с энергиями  $E_p = 50$  кэВ. Эти повреждения приводят к уменьшению внутреннего компонента, отраженного покрытием излучения, и являются основной причиной уменьшения интегрального коэффициента отражения  $R_s$  покрытий.

На основании сказанного выше структура покрытия эмалево-керамического типа, подверженного воздействию основных повреждающих факторов космического пространства, может быть представлена схемой, показанной на рис. 1. Кроме того, в этой модели полагается, что границы макрослоев 1, 2 и 3 — резкие; оптические характеристики каждого отдельного слоя не зависят от координат, а третий слой считается неповрежденным.

Исследование влияния поврежденных слоев на отражательную способность покрытия представляет интерес как с теоретической точки зрения, так и с точки зрения испытаний ТРП в лабораторных и натуральных условиях.

Проблеме распространения света в сильномутных средах, к которым относятся ТРП рассматриваемого типа, посвящено много работ, большая часть которых упомянута в [9—11]. Там же приводятся способы описания взаимодействия света с макроскопически однородными рассеивающими средами, обсуждаются границы применимости и степени приближения теоретических расчетов, а также приводится анализ экспериментальных методов исследования мутных сред с позиций об-

<sup>1</sup> Ст. Кошеляева Е. М., Бородулина В. П., Замбрицкого А. П., Пузанова А. А. см. с. 25.

шей теории переноса излучений. Кроме того, в печати регулярно появляются работы, посвященные поиску новых методов исследования светорассеивающих сред, основанных как на решении интегродифференциального уравнения переноса (см. [12—14]), так и на развитии широко распространенного на практике двухпоточкового приближения Гуревича — Кубелки — Мунна [15—19].

Среди этих публикаций редким исключением являются работы, уделяющие внимание исследованию макроскопически неоднородных сред, в которых спектральные показатели поглощения  $\alpha_\lambda$  и рассеяния  $\sigma_\lambda$  зависят от координат среды, в частности от ее глубины [14—18]. Однако непосредственное применение результатов данных работ к исследованию оптических свойств поврежденных ТРП требует знания или априорного задания индикатрис рассеяния среды или их компонентов разложения [16]. К тому же эти работы

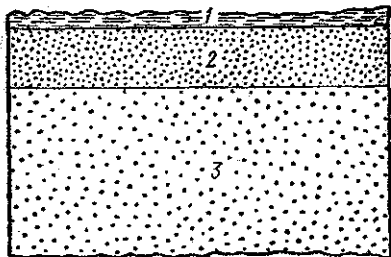


Рис. 1. Структура поврежденного ТРП: 1 — поверхностный слой, 2 — слой покрытия, поврежденный корпускулярным излучением, 3 — неповрежденный слой

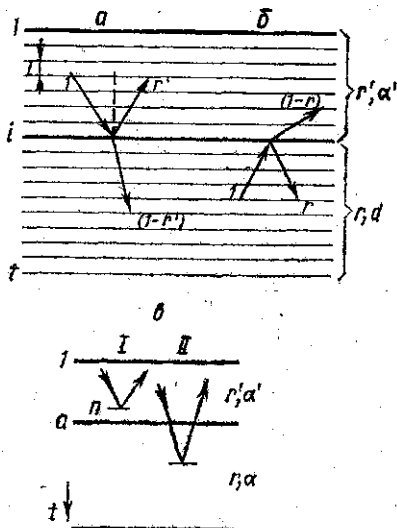


Рис. 2. Оптические пути лучей в модели покрытия: а и б — учет границы раздела макрослоев в зависимости от направления прихода лучей,  $\sigma$  — однократное отражение света от границ элементарных слоев: I — отражение в поврежденном слое, II — отражение в неповрежденном слое

не позволяют решать (даже в первом приближении) обратную спектральноаналитическую задачу определения изменения спектрального показателя поглощения покрытия по экспериментально измеряемым оптическим параметрам ТРП [11].

В настоящей работе подход, использованный в [20—22], применен для случая макроскопически неоднородных сред. Основанием к этому служит определенное соответствие структуры поврежденного ТРП модели среды. Кроме того, подходя к мутной среде как к стопе плоскопараллельных слоев и используя формулы, предложенные в [20—22], мы можем представить отраженное покрытием излучение в виде суммы внутреннего компонента излучения, вышедшего из глубины покрытия, и внешнего компонента излучения, отразившегося от поверхностного слоя. Такое представление дает возможность отдельно анализировать влияние поверхностных и глубинных повреждающих воздействий факторов космического пространства на отражательную

способность покрытия. Для установления связи между изменением внешнего компонента отражательного излучения и оптическими свойствами поверхностного слоя покрытия могут быть использованы результаты работ [5, 6] и [23, 24], в данной работе выясняется влияние глубинных повреждений ТРП на его отражательную способность без учета внешнего компонента.

Представим эмалево-керамическое покрытие в виде совокупности  $t$  элементарных слоев (рис. 2, а, б). Положим толщину элементарного слоя  $l$ , соответствующую размеру рассеивающей частицы пигмента и равной для определенности 0,4 мкм. Каждый элементарный слой будем характеризовать показателем поглощения  $\alpha$  и коэффициентом отражения на его границе  $r$ :

$$r = 2r_0/(1 + r_0) \text{ и } r_0 = (n_2 - n_1)^2/(n_2 + n_1)^2, \quad (1)$$

где  $n_1$  и  $n_2$  — показатели преломления основного вещества (пигмента) и связующей среды. Поглощением в связующей среде и разностью коэффициентов отражения на границе связующее вещество — пигмент и пигмент — связующее вещество в данной композиции пренебрегаем. Поглощение света при прохождении через элементарный слой подчиняется закону Бугера. Под воздействием ионизирующего излучения часть элементарных слоев покрытия (с  $l$  по  $i$ ), суммарная толщина которых соответствует пути пробега ионизирующих частиц, изменит свои оптические характеристики. Обозначим показатель поглощения элементарных слоев, подверженных воздействию ионизирующего излучения, через  $\alpha'$ , а коэффициенты отражения на их границах — через  $r'$ . Границу раздела макрослоев учтем следующим образом. Если пучок лучей выходит из неповрежденного макрослоя и входит в поврежденный (рис. 2, а), то часть пучка  $r'$  отразится, а через границу пройдет часть пучка, равная  $(1 - r')$ ; если пучок лучей входит в неповрежденный слой из поврежденного (рис. 2, б), то отразится от границы раздела  $r$  и пройдет через границу  $(1 - r)$  часть падающего на нее пучка лучей.

Границу раздела поверхностного слоя покрытия (см. рис. 1) и окружающей среды и его влияние пока учитывать не будем.

Далее считая, что на первый элементарный слой поврежденной части покрытия падает монохроматичный свет, интенсивность которого равна  $I$ , найдем интенсивность отраженного покрытием света  $R'$ . При этом будем последовательно учитывать все возможные варианты отражения света от границ элементарных слоев: однократное (рис. 2, в), трехкратное (рис. 3, а), пятикратное (рис. 3, б). Учет отражений высших кратностей сильно загромождает изложение, поэтому на основании оценочных данных, приведенных в [22], ограничимся рассеяниями света, кратность которых не выше пяти<sup>1</sup>, т. е.:

$$R' = R_1 + R_3 + R_5, \quad (2)$$

<sup>1</sup> Анализ распространения света в мутных средах, основанный на учете рассеяний малой кратности, обоснован с точки зрения общей теории переноса излучения, если удельное поглощение среды  $\beta = \alpha/\sigma \gg 2$ . В этом случае средняя кратность рассеяния  $\bar{n}$ , как показано в работе [25], для сред со сферической индикатрисой рассеяния составляет  $\bar{n} = \sqrt{1 + \beta^{-1}}$ . Для эмалево-керамических покрытий это условие может быть всегда выполнено, например в области спектра, где  $R < 0.4$ . В области спектра, где отражательная способность покрытия близка к единице, средняя кратность рассеяния света  $\bar{n}$  возрастает, поэтому время расчета коэффициентов отражения таких сред данным методом существенно увеличивается.

где  $R_1$ ,  $R_3$ ,  $R_5$  — интенсивности света, вышедшего из покрытия после одно-, трех- и пятикратного отражения от всех границ элементарных слоев.

В рамках описанной модели просуммируем интенсивности света, однократно отраженного границами элементарных слоев. Из рис. 2, в

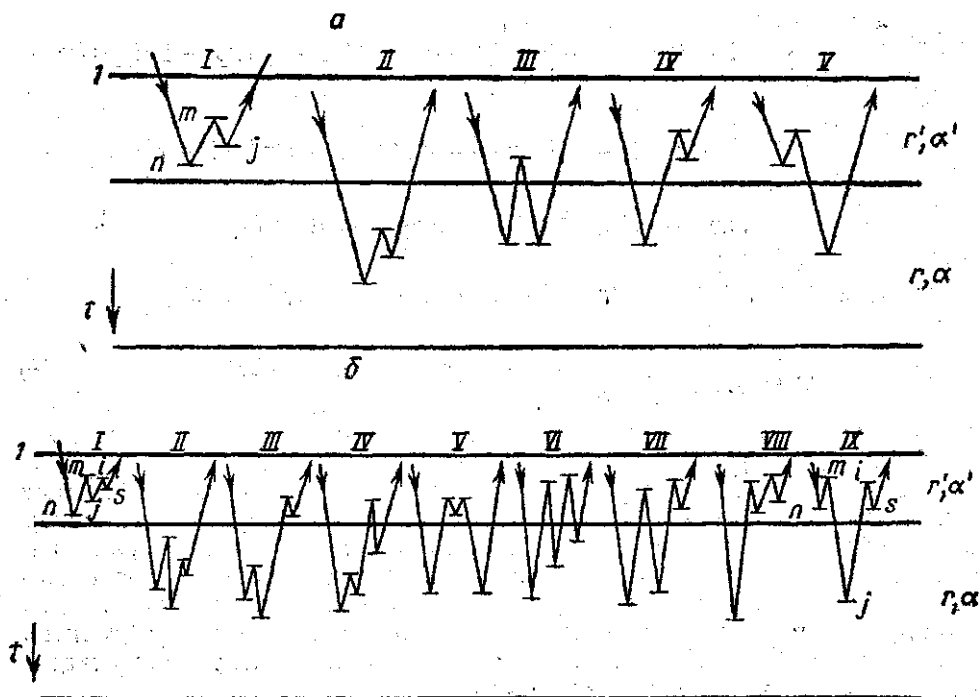


Рис. 3. Возможные варианты пути лучей при многократном отражении света от границ элементарных слоев: а — трехкратное и б — пятикратное отражение

видно, что существуют два варианта отражения пучка лучей, проникших в покрытие: либо лучи отражаются в поврежденном макрослое (I), либо, пройдя его, отражаются в неповрежденном слое (II). Следовательно, интенсивность однократно рассеянного света, вышедшего из покрытия (без учета наружной границы покрытия), можно выразить как

$$R_1 = \sum_{n=1}^{10} r' (1 - r')^{2(n-1)} \cdot \exp[-2\alpha' l(n-1)] + \sum_{n=1}^{30} r (1 - r')^{19} \cdot \exp(-20\alpha' l) \cdot (1 - r)^{2n-1} \cdot \exp(2\alpha l n), \quad (3)$$

где индекс  $n$  относится к номеру слоя, на границе которого происходит первое отражение. С целью сокращения выкладок и уменьшения времени расчета здесь принято, что число поврежденных элементарных слоев составляет 10, а общее их число в покрытии — 40.

Интенсивность света, вышедшего из покрытия после трехкратного отражения на границах элементарных слоев, может быть выражена суммой, состоящей из слагаемых, соответствующих каждому из воз-

можных вариантов прохождения лучей (рис. 3, а). Так как IV и V варианты равнозначны, эта сумма выразится как

$$\begin{aligned}
 R_3 = & \sum_{n=2}^{10} \sum_{m=1}^{n-1} \sum_{j=m+1}^{10} (r')^3 (1-r')^{-4} \exp(2\alpha' l) [(1-r')^2 \exp(-2\alpha l)]^{n+j-m} + \\
 & + \sum_{n=1}^{30} \sum_{m=0}^{n-1} \sum_{j=m+1}^{30} (1-r')^{19} \exp(-20\alpha' l) (1-r)^{-2} r^3 [(1-r)^2 \exp(-2\alpha l)]^{n+j-m} + \\
 & + \sum_{n=1}^{30} \sum_{m=1}^9 \sum_{j=1}^{30} r' r^2 ((1-r')^{38} \exp(-40\alpha' l) (1-r)^{-1} [(1-r')^2 \times \\
 & \quad \times \exp(-2\alpha' l)]^{-m} [(1-r)^2 \exp(-2\alpha l)]^{n+j} + \\
 & + 2 \sum_{n=1}^{30} \sum_{m=1}^9 \sum_{j=m+1}^{10} r (r')^2 (1-r')^{17} (1-r)^{-1} \exp(-20\alpha' l) \times \\
 & \quad \times [(1-r')^2 \exp(-2\alpha' l)]^{j-m} [(1-r)^2 \exp(-2\alpha l)]^n, \quad (4)
 \end{aligned}$$

где индексы  $n$ ,  $m$  и  $j$  — соответствуют номерам слоев, на границах которых происходят первое, второе и третье отражения лучей.

Для пятикратного отражения различных вариантов оптических путей луча в покрытии может быть 13, но III, IV и VII варианты встречаются дважды, поэтому сумма, выражающая интенсивность пятикратного рассеянного и вышедшего из покрытия света, будет состоять из девяти разных членов (рис. 3, б). В связи с громоздкой записью этой суммы приведем здесь выражение только для I и II вариантов прохождения лучей, соответствующих отражениям только в поврежденном слое и только в неповрежденном слое

$$\begin{aligned}
 R_5 = & \sum_{n=2}^{10} \sum_{m=1}^{n-1} \sum_{j=m+1}^{10} \sum_{i=1}^{j-1} \sum_{s=i+1}^{10} (r')^5 (1-r')^{6-i} \exp(2\alpha' l) \times \\
 & \quad \times [(1-r')^2 \exp(-2\alpha l)]^{n+j+s-i-m} + \dots + \\
 & + \sum_{n=1}^{30} \sum_{m=0}^{n-1} \sum_{j=m+1}^{30} \sum_{i=0}^{j-1} \sum_{s=i+1}^{30} r^5 (1-r')^{19} \exp(-20\alpha' l) \cdot (1-r)^{-5} \times \\
 & \quad \times [(1-r)^2 \exp(-20\alpha l)]^{n+j+s-i-m}. \quad (5)
 \end{aligned}$$

Расчет выражения (2) проводился по составленной для ЭВМ БЭСМ-6 программе. Исходными параметрами являлись  $\alpha$  и  $r$  неповрежденного слоя, а параметры  $\alpha'$  и  $r'$  поврежденного слоя покрытия пробегали ряд значений.

С целью проверки правильности формул (3) — (5), верности функционирования программы и возможности сравнения с расчетными данными работы [22] значения параметров  $\alpha'$  и  $r'$  задавались такими же, как в [22]. Параметры  $l$ ,  $\alpha l$  и  $r$  считались постоянными и равными  $l=0,4$  мкм,  $\alpha l=0,04$ ;  $r=0,08$ . Результаты расчетов величин  $R'$ , соответствующих ряду значений  $\alpha' l$  и  $r'$ , приведены в табл. 1.

Для сравнения полученных значений  $R'$  с результатами работы [22] необходимо учесть влияние границы покрытия так же, как это сделано в указанной работе:

Таблица 1

Значения отражательной способности  $R'$  двухслойной системы

$\alpha'l$ \ $r'$	0,04	0,1	0,16	0,2	0,25	0,04
0,02	0,276	0,462	0,558	0,592	0,624	0,269
0,05	0,219	0,387	0,484	0,527	0,568	0,214
0,07	0,191	0,349	0,446	0,493	0,538	0,188
0,1	0,160	0,306	0,402	0,451	0,501	0,158
0,3	0,081	0,181	0,263	0,314	0,367	0,081
0,5	0,061	0,143	0,217	0,263	0,318	0,061
0,7	0,052	0,125	0,194	0,238	0,291	0,051
1,0	0,046	0,112	0,177	0,219	0,271	0,046
2,0	0,041	0,102	0,162	0,202	0,253	0,041
3,0	0,040	0,100	0,160	0,200	0,250	0,040
	$R' = R_1 + R_3$					$R_1$

$$R = r_0 + \frac{(1 - r_0)^2 \exp(-2\alpha'l)}{1 - r_0 \cdot R' \exp(-2\alpha'l)} R' \quad (6)$$

где  $R$  — рассчитанные значения отражательной способности двухслойной системы с учетом поверхностного отражения.

В табл. 2 приведены рассчитанные значения  $R$  и величины отражательной способности полубесконечного слоя  $R_\infty$ , соответствующие оптическим параметрам  $\alpha'l$ . Остановимся на анализе данных этой таблицы.

Таблица 2

Сравнение отражательной способности двухслойного покрытия  $R$  с отражательной способностью полубесконечного слоя среды  $R_\infty$ .

$\alpha'l$	0,02	0,05	0,07	0,1	0,3	0,5	0,7	1	2	3
$R_\infty$	0,392	0,241	0,193	0,150	0,063	0,041	0,032	0,026	0,021	0,020
$R$	0,25	0,21	0,18	0,146	0,063	0,041	0,032	0,027	0,023	0,020

1. При  $\alpha'l < 0,1$  отражательная способность рассматриваемой двухслойной системы  $R$  меньше отражательной способности однородного полубесконечного слоя  $R_\infty$  с такими же параметрами  $\alpha'l$ . Это объясняется тем, что ради экономии машинного времени расчет отражательной способности проводился для системы, состоящей только из 40 элементарных слоев, что в данном расчете учитывались отражения, кратность которых не выше трех. Для пятикратного отражения (рис. 3, б) были вычислены  $R_5$  лишь для некоторых значений  $\alpha'l$ . Так как рассчитанные значения  $R_5$  оказались малыми по сравнению с соответствующими им  $R_1 + R_3$ , они в дальнейшем не учитывались. Из сказанного следует, что различие отражательных способностей сравниваемых объектов в указанной области оптических параметров связано практически только с малой толщиной (т. е. с прозрачностью) расчетной модели.

2. При  $0,1 \leq \alpha' l \leq 0,7$  отражательные способности расчетной модели и полубесконечного слоя близки, это означает, что их оптические толщины одинаковы.

3. В области  $0,7 < \alpha' l < 2$ ,  $R > R_{\infty}$ . Это может быть связано с меньшим объемным поглощением света в двухслойной модели по сравнению с полубесконечным слоем, так как слой 2 (рис. 1) имеет существенно меньшее поглощение ( $\alpha' l = 0,04$ ), чем  $\alpha' l$  полубесконечной среды. В этой области отражательные способности сравниваемых объектов отличаются не более чем на 10%. Последнее говорит об определяющем значении слоя 1 в формировании отражательной способности двухслойной системы.

4. При  $\alpha' l > 2$  значения отражательных способностей сближаются, а при  $\alpha' l > 3$  совпадают. В этом случае отражательная способность двухслойной системы полностью определяется слоем 1.

5. Из данных табл. 1 (последний столбец), кроме того, можно сделать вывод, что при  $\alpha' l > 0,1$  и  $r' = 0,04$  можно учитывать только однократные отражения света в рассматриваемой двухслойной модели неоднородной мутной среды.

Проведенный выше анализ показывает, что модель двухслойного покрытия и программа расчета ее отражательной способности в целом верны. Поэтому можно попытаться применить предложенную методику к исследованию изменения оптических свойств конкретного ТРП под воздействием протонного облучения.

Для данного покрытия известно:  $l = 0,4$  мкм — средний размер частиц пигмента,  $n_1 = 1,55$  — коэффициент преломления связующего,  $n_2 = 2,08$  — коэффициент преломления пигмента,  $R_{\lambda 0} = 0,63$  — спектральный коэффициент отражения неповрежденного покрытия. Поврежденный протонным облучением слой считаем однородным по глубине. Параметр  $r'$  принимаем равным параметру  $r$ , так как в соответствии с законом Френеля для поглощающих сред

$$r' = (n_2 - n_1)^2 + \chi^2 / (n_2 - n_1)^2 + \chi^2, \quad (7)$$

изменение показателя поглощения  $\chi = \alpha \lambda / 4\pi$  практически не влияет на величину  $r'$ .

Из данных работы [22] можно положить, что для  $R_{\lambda 0} = 0,63$  показатель поглощения покрытия  $\alpha = 0,002$ . Воздействие протонов с  $E_p = 500$  кэВ приводит к изменению показателя поглощения в слое покрытия толщиной  $\sim 4$  мкм (10 элементарных слоев). Это изменение можно считать пропорциональным [10, 13] числу протонов, облучающих  $1 \text{ см}^2$  покрытия ( $\Phi$ ).

Расчет изменения отражательной способности покрытия в зависимости от  $\alpha'$  поврежденного слоя покрытия (без учета поверхностного отражения) проводился по поставленной ранее программе. Данные расчета приведены в табл. 3 и на рис. 4.

Кроме того, на рис. 4 обозначено значение спектральной отражательной способности покрытия перед облучением протонами. Масштабы по осям абсцисс выбраны такими, чтобы увеличению числа облучающих протонов  $\Phi$  в 2 раза соответствовало бы увеличение показателя поглощения повреждаемого слоя также в 2 раза. Так как едва заметное изменение коэффициента отражения покрытия на основе ZnO происходит только при облучении его  $1 \text{ см}^2$  числом протонов  $\Phi = 10^{14}$ , то для данного типа покрытия  $\alpha l \approx 0,002$  соответствует указанному числу облучающих протонов. В данной работе не представлялось возможным провести измерения спектральной отражательной способности



Таблица 3

Изменение отражательной способности и ее составляющих при изменении показателя поглощения  $\alpha'$  поврежденного слоя покрытия

$\alpha'l$	$R' = R_1 + R_2$	$R_1$	$R$	$R_{\infty}$
0,002	0,563	0,484	0,580	0,735
0,01	0,503	0,437	0,500	0,503
0,02	0,439	0,386	0,424	0,392
0,04	0,343	0,310	0,328	
0,05	0,306	0,280	0,286	0,241
0,07	0,248	0,232	0,228	0,193
0,1	0,191	0,182	0,170	0,150
0,2	0,109	0,108	0,090	
0,5	0,061	0,061	0,041	0,041
0,7	0,052	0,052	0,032	0,032
1	0,046	0,46	0,026	0,026
3	0,0401	0,0401	0,02	0,020

покрытий в процессе их облучения протонами в вакуумной камере, а вынос покрытия на атмосферу приводил к отбеливанию наведенных центров поглощения и, следовательно, к завышенным значениям отражательной способности. В настоящее время разработан экспериментальный спектрофотометр, который позволяет измерять отражательную способность покрытий в процессе их облучения и позволит провести экспериментальную проверку данных табл. 3 и рис. 4.

В заключение отметим, что описанный метод в рамках принятой модели позволяет отыскивать показатель поглощения слоя покрытия по экспериментально измеренным значениям, отражательной способности и рассчитывать поведение спектральной отражательной способности покрытий под действием корпускулярных потоков излучения.

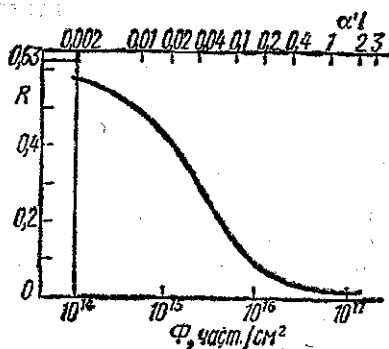


Рис. 4. Изменение спектральной отражательной способности покрытия, рассчитанное по двухслойной модели, и экспериментально измеренное значение  $R_{\infty}$  перед началом облучения протонами

ЛИТЕРАТУРА

1. Progress in astronautics and aeronautics (Rocketry), vol. 18, 20, 21, 23, 24. Academic Press, N. Y., 1974.
2. Органические защитные покрытия под ред. М. М. Гуревича. М.—Л., 1959.
3. Теплообмен и тепловой режим космических аппаратов, под ред. Н. А. Анфимова. М., 1974.
4. Моделирование тепловых режимов космических аппаратов и окружающей их среды, под ред. Г. И. Петрова. М., 1971.
5. Торопец А. С. Исследование отражения света шероховатыми поверхностями и светорассеивающими средами. Автореферат докт. дис. Л., 1970.
6. Кошеляев Е. М., Бородулин В. П., Замбржицкий А. П., Пузанов А. А. «Вестн. Моск. ун-та. Физ., астрон.», 1977, 18, № 5, 25.
7. Околосреднее космическое пространство, под ред. В. П. Шабановского. М., 1966.
8. Бете Г. А., Ашкин Ю. «Экспериментальная ядерная физика», 1955, 1.
9. Розенберг Г. В. «Успехи физических наук», 1959, 69, вып. 1, 57.
10. Иванов А. П. Оптика рассеивающих сред. Минск, 1969.

11. Розенберг Г. В. «Успехи физических наук», 1967, 91, вып. 4, 569.
12. Мороженко А. В., Яновицкий Э. Г. «Астрономический журнал», 1971, 48, 795.
13. Оцисик М. Н. Сложный теплообмен, под ред. Н. А. Анфимова. М., 1976.
14. Черняк Ю. Б., Луничев В. П., Соловьев Г. Г. «Вести Моск. ун-та. Физ., астрон.», 1977, 17, № 1.
15. Середенко М. М., Ицко Э. Ф. «Оптико-механическая промышленность», 1972, № 4.
16. Белов Г. Я. «Теплофизика высоких температур», 1972, 10, вып. 6, 268.
17. Сохновский М. Ю., Котик А. Ф. «Оптика и спектроскопия», 1973, 34, вып. 6, 1187.
18. Белов Г. Я. «Теплофизика высоких температур», 1974, 12, вып. 4, 1228.
19. Гуревич М. М. «Оптико-механическая промышленность», 1976, № 5, 10.
20. Vodo L. «Acta Phys. Acad. Sci. Hungaricae», 1950, 1, N 2, 135.
21. Антонов-Романовский В. В. ЖЭТФ, 1954, 26, вып. 4, 459.
22. Гирич О. П., Степанов Б. И. «Оптика и спектроскопия», 1954, 27, вып. 4, 467.
23. Войшвилло Н. А. «Оптика и спектроскопия», 1967, 22, вып. 6, 956.
24. Beckman P., Spizzichino A. The scattering of Electromagnetics wave from rough surface. Pergamon Press, 1963.
25. Амбарцумян В. А. ДАН АрмССР, 1948, 8, вып. 3, 101.

Поступила в редакцию  
18.1 1977 г.  
НИИЯФ