

УДК 621.315.3:533.9

Ю. А. Похил<sup>1</sup>, В. В. Абраимов<sup>1</sup>, Г. И. Сальтевский<sup>1</sup>, И. П. Зарицкий<sup>1</sup>,  
В. А. Лотоцкая<sup>1</sup>, А. В. Кревсун<sup>1</sup>, Н. Н. Агашкова<sup>1</sup>, М. М. Пристюк<sup>1</sup>,  
В. Г. Тихий<sup>2</sup>, И. А. Гусарова<sup>2</sup>, А. М. Потапов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України, Харків

<sup>2</sup> Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля, Дніпропетровськ

## ВОЗДЕЙСТВИЕ НАЗЕМНО ИМИТИРУЕМЫХ ФАКТОРОВ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА НА ТЕРМООПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

*Досліджується вплив факторів космічного простору на зміни термооптичних і електрофізичних характеристик ряду неметалевих конструкційних і функціональних матеріалів зовнішніх поверхонь космічного апарата МС-2-8. Використано метод пришвидшеного лабораторного моделювання п'ятирічного перебування апарата на сонячно-синхронній орбіті висотою 670 км. Експериментально досліджено стійкість цих матеріалів до інтегрального впливу вакууму, електронів і протонів радіаційних поясів Землі, електромагнітного випромінювання Сонця, циклічних орбітальних змін температури.*

### ВВЕДЕНИЕ

Основные тенденции современного космического аппарата- и приборостроения — увеличение времени активной жизни космических аппаратов (КА) до 10—15 лет, негерметичность их конструкции, широкое использование новых полимерных композиционных материалов. Поэтому является актуальным применение методов физического моделирования для всестороннего исследования поведения материалов КА в условиях наземного форсированного воздействия основных факторов космического пространства (ФКП) — глубокого вакуума, потоков высокоэнергичных заряженных частиц, электромагнитного излучения Солнца, термоциклирования и др. Воздействие совокупности этих факторов на материалы КА носит сложный характер, приводя зачастую к проявлению эффектов синергизма. Это обстоятельство накладыва-

ет специфические требования к методам исследования и оборудованию, которые должны обеспечивать адекватную комплексную ускоренную наземную имитацию ФКП. Такая база создана и активно функционирует в ФТИНТ НАН Украины [3].

Одним из условий нормальной работы КА является поддержание в допустимых пределах теплового режима его элементов конструкции и бортовой научной аппаратуры. Эту функцию частично или полностью выполняют пассивные системы терморегулирования, основным элементом которых являются терморегулирующие покрытия. При этом тепловой режим элементов КА зависит, как известно [9], от термооптических характеристик покрытия, в частности: интегрального коэффициента  $A_s$  поглощения солнечного излучения, интегрального коэффициента  $\epsilon$  излучения/поглощения (степень черноты) в тепловом ИК-диапазоне и их отношения  $A_s/\epsilon$ . Под действием ФКП термооптические характеристики покрытия могут существенно измениться, что приведет к нарушению допустимых показателей теплового режима КА. По-

© Ю. А. ПОХИЛ, В. В. АБРАИМОВ, Г. И. САЛЬТЕВСКИЙ,  
И. П. ЗАРИЦКИЙ, В. А. ЛОТОЦКАЯ, А. В. КРЕВСУН,  
Н. Н. АГАШКОВА, М. М. ПРИСТЮК, В. Г. ТИХИЙ,  
И. А. ГУСАРОВА, А. М. ПОТАПОВ, 2009

этому знание таких характеристик, их чувствительности к длительному воздействию ФКП позволяет выбрать прогнозируемый и наиболее устойчивый материал терморегулирующего покрытия при создании пассивных систем терморегулирования долгоживущих КА. Обзор работ по влиянию ФКП на оптические характеристики терморегулирующих покрытий приведен в [8].

Значительной проблемой при создании КА является обеспечение электро-радиационной безопасности на различных околоземных орбитах. В этих условиях на аппарат воздействуют потоки электронов и протонов радиационных поясов Земли, электронно-ионные компоненты «горячей» (магнитосферной) и «холодной» (ионосферной) плазмы с энергией частиц 0.1–100 МэВ, электромагнитное излучение Солнца [5]. Космический аппарат представляет собой конструкцию из разнородных диэлектрических материалов на внешней поверхности и во внутренних отсеках. Из-за различных условий облучения и различий во вторично-эмиссионных свойствах диэлектрических материалов происходит неоднородное накопление на поверхности КА избыточных электрических зарядов и возникновение значительной разности потенциалов (до десятков киловольт) между отдель-

ными элементами и между аппаратом и окружающей плазмой [11, 12]. По этой причине могут происходить поверхностные и объемные электрические пробой, что приводит к выходу из строя жизненно важных систем (солнечные батареи, оптические приборы, антенны). Эффективным способом борьбы с радиационно-стимулированными пробоями является выбор материалов внешних поверхностей КА, имеющих, с одной стороны, высокие резистивные и диэлектрические свойства, электрическую прочность, а с другой стороны пониженную склонность к накоплению зарядов и способность к быстрой их релаксации. При этом электрофизические свойства должны сохраняться на допустимом уровне в течение длительного радиационного и температурного воздействий космической среды. Решение этой проблемы также требует проведения соответствующих ускоренных имитационных испытаний.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Объекты.** В качестве объектов исследования (см. табл. 1), выбраны материалы и некоторые элементы конструкции, образующие внешнюю поверхность микроспутника МС-2-8 разработки ГП «КБ «Южное».

Таблица 1. Объекты исследования, действующие факторы космического пространства и измеряемые характеристики

| Исследуемый материал   | Интервал термоциклирования, количество термоциклов $N$ | Наличие радиационного воздействия | Измеряемые характеристики      |
|--|--|-----------------------------------|--------------------------------|
| Эмаль АК-512 (белая и черная)                                | +100...–100 °C; $N = 100$                              | +                                 | $A_s, \varepsilon$             |
| Тепловой экран   | +100...–100 °C; $N = 100$                              | +                                 | $A_s, \varepsilon$             |
| Эпоксидное связующее ЭДТ-10 каркаса панели солнечных батарей | +100...–100 °C; $N = 100$                              | +                                 | $A_s, \varepsilon$             |
| Пленка НИИКАМ-РАМ-2  | +60...–60 °C; $N = 130$                                | +                                 | $A_s, \varepsilon$             |
| Углепластик на основе УКН-5000                               | —  | +                                 | $A_s, \varepsilon$             |
| Углепластик на основе ЛУП-02                                 | —  | +                                 | $A_s, \varepsilon$             |
| Сотовая конструкция — каркас панели солнечных батарей        | +100...–100 °C; $N = 100$                              | +                                 | $A_s, \varepsilon, R$          |
| Стеклотекстолит СФ-2-50Г                                     | +100...–100 °C; $N = 100$                              | +                                 | $\rho_v, \xi, \text{tg}\delta$ |
| Пресс-материал ДСВ-4   | +100...–100 °C; $N = 100$                              | +                                 | $\rho_v, \xi, \text{tg}\delta$ |
| Фторопласт ФАФ-4Д-2.5  | +100...–100 °C; $N = 100$                              | +                                 | $\rho_v, \xi, \text{tg}\delta$ |
| Фторопласт Ф-4   | —  | +                                 | $\rho_v, \xi, \text{tg}\delta$ |
| Полиэтилен 107-02К   | —  | +                                 | $\xi, \text{tg}\delta$         |
| Стержень текстолитовый 13                                    | +45...–10 °C; $N = 130$                                | —                                 | $R_i, \rho_s$                  |
| Текстолит А  | +45...–10 °C; $N = 130$                                | —                                 | $\rho_v$                       |
| Гетинакс 1-1.0   | +45...–10 °C; $N = 130$                                | —                                 | $\rho_v$                       |
| Лак УР-231   | +60...–60 °C; $N = 130$                                | —                                 | $\rho_v, \xi, \text{tg}\delta$ |

В табл. 1 приведены данные о видах и параметрах ФКП, воздействующих на материалы: интервалах температур орбитального термоциклирования  $\Delta T$ ; количестве термоциклов  $N$ ; наличии радиационного воздействия (флюэнсы электронов и протонов  $F_e = 4.50 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ,  $F_p = 2.76 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ , соответствующие пятилетнему пребыванию КА на солнечно-синхронной орбите высотой 670 км, длительность облучения электромагнитным излучением Солнца 100 ч); приведен также перечень измеряемых характеристик материалов до и после воздействия ФКП: интегральные коэффициенты поглощения  $A_s$  и излучения  $\epsilon$ , электросопротивление изоляции  $R$ , объемное удельное электросопротивление  $\rho_v$ , поверхностное удельное электросопротивление  $\rho_s$ , внутреннее сопротивление  $R_v$ , диэлектрическая проницаемость  $\xi$ , тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$ . Указанные воздействия проводили в вакуумной камере с черными криогенными экранами при исходном давлении остаточных газов 10 мкПа.

**Комплексная имитация факторов космического пространства.** Одновременное воздействие ФКП на исследуемые образцы материалов и элементов конструкции КА проведено на созданном в ФТИНТ НАН Украины комплексном имитаторе КИФК [1].

Образцы устанавливались на грани поворотного держателя в криогенно-вакуумной камере. Облучение электромагнитным излучением Солнца проводили с использованием двух имитаторов:

1) имитатора излучения Солнца ИС-160 в диапазоне длин волн 250—2200 нм, который обеспечивает освещенность образцов в одну солнечную постоянную;

2) газоструйного источника ВУФ-излучения Солнца в интервале длин волн 5—170 нм [2] в режиме пятикратного ускоренного облучения образцов.

Время облучения образцов каждым имитатором составляет 100 эквивалентных солнечных часов.

Давление остаточных газов в вакуумной камере КИФК до начала облучения составляло 10 мкПа; в процессе облучения — 480 мкПа.

Имитация воздействия корпускулярного излучения естественных радиационных поясов

Земли на орбите КА МС-2-8 проводилась с использованием ускорителей электронов и протонов на совмещенных пучках [4], входящих в состав КИФК. Облучение образцов проводилось моноэнергетическими потоками протонов и электронов с энергиями 160 кэВ. Замена широкого спектра энергий частиц в радиационных поясах Земли на моноэнергетический поток частиц с выбранной энергией при ускоренных имитационных испытаниях обусловлен техническими возможностями КИФК и оправдан тем обстоятельством, что для заданной орбиты КА МС-2-8 определяющая доля интегральной плотности потоков электронов и протонов приходится на интервал энергий 0.05—0.3 МэВ (по данным документа ГП «КБ «Южное» «Аппарат космический МС-2-8. Требования по стойкости бортовой аппаратуры к факторам космического пространства»). Из этого документа определяются для рассматриваемой орбиты значения интегральных плотностей потоков электронов  $\phi_e = 2.85 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  и протонов  $\phi_p = 1.75 \times 10^3 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  в указанном интервале энергий.

Эквивалентность имитационных экспериментов орбитальным условиям достигается выполнением равенства флюэнсов частиц, падающих на поверхность образцов в космосе и в имитаторе:

$$F_k = F_u, \text{ или } \phi_k t_k = \phi_u t_u, \quad (1)$$

где  $\phi_k$ ,  $\phi_u$  — плотности потока частиц в космосе и имитаторе,  $t_k$  — длительность орбитального полета КА (в нашем случае  $t_k = 5 \text{ лет} \approx 1.58 \cdot 10^8 \text{ с}$ ),  $t_u$  — время облучения образцов в имитаторе.

Из (1) флюэнсы электронов и протонов на орбите МС-2-8 за пять лет полета имеют значения:  $F_k^e = 4.50 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  и  $F_k^p = 2.76 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ .

Значение  $\phi_u$  задается величиной тока  $I$  пучка в протонном и электронном трактах ускорителей и площадью облучаемой поверхности  $S$ :

$$\phi_u = \frac{I}{e \cdot S}, \quad (2)$$

где  $e = 1.6022 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  — заряд электрона (протона),  $S = 100 \text{ см}^2$ ,  $I = 10^{-7} \text{ А}$  — сила тока электронного и протонного пучков, достаточная для устойчивой работы ускорителей.

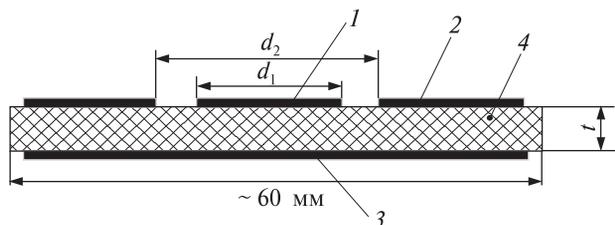


Рис. 1. Образец 4 диэлектрического материала с напыленными на нем электродами: 1 — электрод измерительный, 2 — электрод охранный (напряжения), 3 — электрод напряжения (охранный) для измерения диэлектрических свойств и объемного (поверхностного) сопротивления

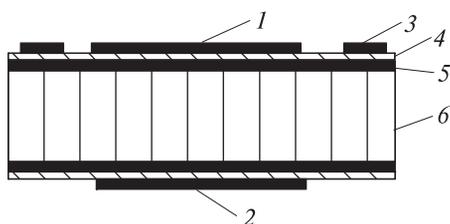


Рис. 2. Образец каркаса панели солнечной батареи для измерения сопротивления его изоляции: 1, 2, 3 — измерительный, потенциальный и охранный электроды, 4 — изолирующий слой, 5 — углепластик, 6 — алюминиевые соты

Из соотношения (2) получаем значения плотностей потоков электронов и протонов в ускорителе:  $\varphi_n^e = \varphi_n^p = 6.24 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ .

Времена облучения образцов электронным и протонным пучком в имитаторе, необходимые для соблюдения условия эквивалентности (1), равны

$$t_n^e = \frac{F_k^e}{\varphi_n^e} = 7200 \text{ с}, \quad t_n^p = \frac{F_k^p}{\varphi_n^p} = 44 \text{ с}. \quad (3)$$

#### Имитация орбитального термоциклирования.

Испытания на термо-циклическое воздействие проводились согласно стандарту ECSS-Q-70-04A в стенде ТВЦ конструкции ФТИНТ НАН Украины [7]. В криогенно-вакуумной камере образцы устанавливались на предметный столик, температура которого циклически изменялась по заданной программе. Давление остаточных газов в камере перед испытанием составляло  $10^{-5}$  Па, во время испытаний —  $6 \cdot 10^{-3}$  Па.

**Методика измерения термооптических характеристик материалов.** Интегральные коэффициенты  $A_s$  и  $\epsilon$  измерялись на плоских ( $50 \times 50$  мм) образцах с помощью фотометра ФМ-59 и терморациометра ТРМ-И с использованием образцов сравнения. На каждом образце проводилось 10—15 измерений в разных участках поверхности и определялось среднее значение измеряемой величины.

Коэффициент поглощения  $A_s$  определяли, измеряя коэффициент отражения  $R_s$  ( $A_s = 1 - R_s$  для непрозрачного терморегулирующего покрытия) фотометром ФМ-59 в интервале длин волн 0.3—2.4 мкм. Прибор настраивался по эталонным образцам. Разброс показаний при повторных измерениях не превышал 2 %.

Степень черноты  $\epsilon$  измерялась в диапазоне 4—40 мкм, соответствующем области спектральной чувствительности терморациометра ТРМ-И. Прибор калибровался по зеркалу и модели черного тела, приданным к прибору. Перед каждым измерением проводилась проверка показаний прибора по контрольному образцу прибора. Разброс показаний при повторных измерениях в одинаковых условиях не превышал 2 %.

Измерение  $A_s$  и  $\epsilon$  образцов, подвергнутых воздействию ФКП, проводили в течение 12 ч после завершения испытания.

**Методика измерения диэлектрических свойств материалов** основана на измерении емкости  $C$  конденсатора, образуемого измерительными электродами и исследуемым образцом-диэлектриком. Медные пленочные электроды, показанные на рис. 1, напыляли на верхнюю и нижнюю поверхности образца методом термического испарения в вакууме при температуре поверхности образца не выше  $40^\circ\text{C}$ . Для образцов материала СФ-2-50Г в качестве электрода напряжения 3 использовалась медная фольга на его поверхности. Для образцов двусторонне-го фольгированного листового фторопласта ФАФ-4Д медная фольга на его поверхностях использовалась в качестве электрода напряжения и измерительного электрода. Измерения емкости проводили на частоте 1 МГц измерителем R, L, C типа Е7-12 (ГОСТ 22372-77 и раздел 3 ГОСТ 16336-77).

Диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь вычислялись по формулам

$$\xi = \frac{C_p}{C_0} = \frac{C_p t}{\xi_0 S}, \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{G_p}{2\pi f C_p}. \quad (4)$$

Здесь  $\xi$  — диэлектрическая проницаемость,  $C$  — емкость в параллельной схеме замещения,  $C_0$  — межэлектродная емкость,  $S$  — площадь измерительного электрода,  $t$  — толщина образца,  $\xi_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м — диэлектрическая постоянная,  $G_p$  — проводимость,  $f$  — частота.

**Методика измерения резистивных свойств материалов** основана на измерении электросопротивления постоянному току исследуемого образца материала (ГОСТ 6433.1 и ГОСТ 6433.2) в вакууме или на воздухе при нормальной температуре до и после воздействия на него ФКП. Измерения проводили тераомметром Е6-13А при напряжении постоянного тока 100 В. По результатам измерений определяются объемное, поверхностное и/или внутреннее сопротивление. Вид образца, способ напыления и вид измерительных электродов при определении объемного и поверхностного сопротивления аналогичны предыдущей методике (см. рис. 1).

Удельное объемное и удельное поверхностное сопротивление материала образца вычисляются по формулам

$$\rho_v = \pi \frac{D_0^2}{4t} R_v, \quad \rho_s = \pi \frac{D_0}{g} R_s, \quad (5)$$

где  $t$  — толщина образца,  $D_0 = (d_1 + d_2)/2$ ,  $R_v$ ,  $R_s$  — измеренные объемное и поверхностное сопротивления,  $g = (d_2 - d_1)/2$  — ширина зазора между измерительным электродом и электродом напряжения.

Определение внутреннего сопротивления проводили на образцах, в которых с противоположных сторон просверливались два несквозных отверстия для электродов, расстояния между центрами отверстий 15 мм (ГОСТ 6433.2-71).

При измерении объемного сопротивления изоляции внешней поверхности каркаса солнечных батарей (ГОСТ 6433.2-71) наносились медные электроды в форме круга диаметром 40 мм, как показано на рис. 2. Измерения про-

водили в вакууме 0.1 Па при комнатной температуре тераомметром Е6-13А при напряжении постоянного тока 100 В. При измерении сопротивления изоляции одного (лицевого или тыльного) поверхностного слоя алюминиевые соты каркаса использовались в качестве электрода напряжения.

Напыление электродов и измерение диэлектрических и резистивных свойств образцов, подвергнутых воздействию ФКП, проводились в течение 6—8 ч после облучения.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Влияние факторов космического пространства на термооптические характеристики и состояние поверхности.** Результаты измерений коэффициента поглощения солнечного излучения  $A_s$  и степени черноты  $\epsilon$  на образцах исследованных материалов представлены в табл. 2 и на рис. 3.

В результате комплексного воздействия корпускулярного излучения, электромагнитного излучения Солнца и термоциклирования коэффициент  $A_s$  белой эмали АК-512 не изменился и остался в допустимом интервале ( $A_s \leq 0.5$ ); коэффициент  $\epsilon$  уменьшился на 9 % и оказался ниже допустимого значения ( $\epsilon \geq 0.8$ ). При этом отношение  $A_s/\epsilon$ , определяющее терморегуляторную способность покрытия, для белой эмали увеличилось на 11 % по сравнению с исходным значением (см. табл. 2), что находится в допустимых пределах.

Изменение  $A_s$  для черной эмали составило около 2 % (в пределах погрешности прибора), а  $\epsilon$  уменьшился на 15 % и вышел за допустимые значения ( $\epsilon \geq 0.86$ ). Произошло визуально заметное осветление окраски образцов, покрытых черной эмалью, приращение  $\Delta(A_s/\epsilon)/(A_s/\epsilon)_{\text{исх}}$  составило более 15 %.

Еще большее увеличение  $\Delta(A_s/\epsilon)/(A_s/\epsilon)_{\text{исх}}$  (37 %), обусловленное значительным снижением коэффициента  $\epsilon$ , наблюдается для пленки НИИКАМ-РАМ-2.

Эксперименты по термоциклированию эмалевых покрытий показали их низкую устойчивость к резким температурным перепадам — образование многочисленных трещин и отслоений от подложки из алюминиевых сплавов. При

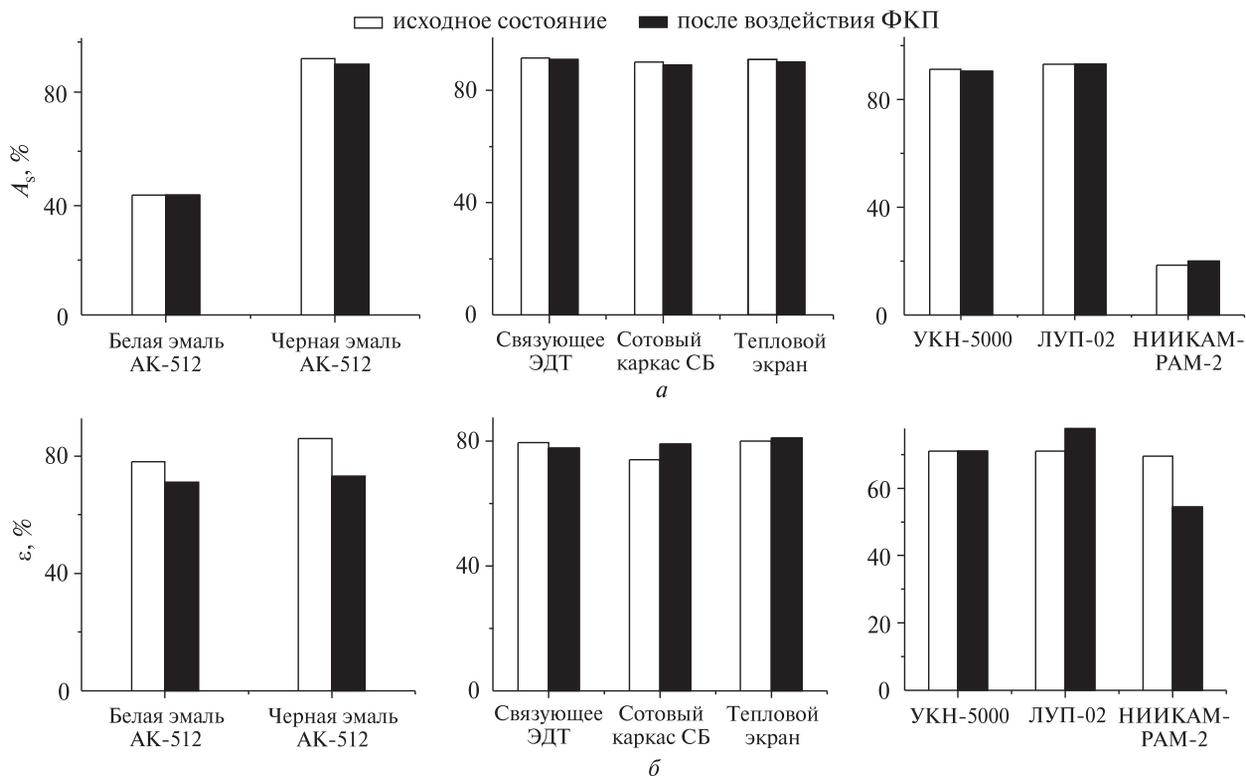


Рис. 3. Действие факторов космического пространства на коэффициент поглощения солнечного излучения  $A_s$  (а) и степень черноты  $\epsilon$  (б) исследованных материалов

Таблица 2. Изменение термооптических характеристик материалов при комплексном воздействии факторов космического пространства

| Материал                         | $A_s$ , %          |                       | $\epsilon$ , %     |                       | $A_s/\epsilon$     |                       | $\Delta(A_s/\epsilon)/(A_s/\epsilon)_{исх}$ , % |
|----------------------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|---|
|                                  | исходное состояние | после воздействия ФКП | исходное состояние | после воздействия ФКП | исходное состояние | после воздействия ФКП |   |
| Белая эмаль АК-512               | 44.0               | 44.0                  | 78.0               | 71.0                  | 0.56               | 0.62                  | +10.7   |
| Черная эмаль АК-512              | 94.0               | 92.0                  | 86.0               | 73.0                  | 1.09               | 1.26                  | +15.6   |
| Эпоксидное связующее ЭДТ         | 91.5               | 91.0                  | 79.5               | 77.7                  | 1.15               | 1.17                  | +1.7  |
| Сотовый каркас солнечных батарей | 90.0               | 89.0                  | 74.0               | 79.0                  | 1.22               | 1.13                  | -7.4  |
| Тепловой экран                   | 91.0               | 90.0                  | 80.0               | 81.0                  | 1.14               | 1.11                  | -2.6  |
| Углепластик УХН-5000             | 91.2               | 90.5                  | 71.0               | 71.0                  | 1.28               | 1.27                  | -0.8  |
| Углепластик ЛУП-02               | 93.0               | 93.0                  | 71.0               | 78.0                  | 1.31               | 1.19                  | -9.2  |
| Пленка НИИКАМ-РАМ-2              | 18.5               | 20.0                  | 69.5               | 54.5                  | 0.27               | 0.37                  | +37.0   |

нанесении между покрытием и подложкой промежуточного слоя эпоксидной смолы или грунтовки растрескивание эмали не наблюдалось. Промежуточный «демпфирующий» слой снижает внутренние термоупругие напряжения между

подложкой и покрытием, работоспособность покрытий сохраняется даже после большого (100) количества термоциклов.

Отметим, что эмаль типа АК-512 относится к классу глубокоматовых эмалей на основе акри-

ловых смол и признана весьма перспективным материалом терморегулирующего покрытия. При нанесении таких эмалей с подслоем грунтовки спектральные отражательные свойства покрытия не зависят от оптических свойств подложек, но существенно определяются микроструктурой поверхности.

Исследование воздействия ФКП на термооптические свойства сотовых каркасов солнечных батарей, тепловых экранов, эпоксидного связующего ЭДТ, углепластиков УКН-5000 и ЛУП-0.2 показало незначительное (1–9 %) изменение величин  $A_s$ ,  $\epsilon$  и  $\Delta(A_s/\epsilon)/(A_s/\epsilon)_{исх}$ . Особенно высокую стойкость имеют углепластик УКН-5000 и эпоксидное связующее ЭДТ.

Таким образом, термооптические характеристики исследованных материалов в основном, кроме черной эмали АК-512 и пленки НИИКАМ-РАМ-2, обладают высокой стойкостью к рассмотренным уровням комплексного воздействия ФКП, что указывает на перспективность применения этих материалов на внешних поверхностях КА. Повышенная деградация параметра  $A_s/\epsilon$  черной эмали АК-512 и пленки НИИКАМ-РАМ-2 определяется заметным снижением степени черноты  $\epsilon$ , что может быть связано как с изменением структурного состояния полимера на молекулярном уровне, так и с изменением состояния его поверхности (степень шероховатости, растрескивание, поверхностная эрозия) и обусловленным этим изменением диффузной составляющей излучения.

**Влияние факторов космического пространства на электрофизические характеристики.** При измерении объемного сопротивления  $R$  изоляции внешней поверхности каркаса солнечной батареи до и после воздействия радиационных факторов и термоциклирования получены такие значения (диаграммы на рис. 4): в исходном состоянии —  $9.1 \cdot 10^{13}$  Ом, после термоциклирования —  $9.0 \times 10^{13}$  Ом, после облучения —  $3.65 \cdot 10^{13}$  Ом.

Из этих результатов видно, что термоциклирование не оказывает заметного влияния на сопротивление изоляции, в то время как совместное облучение протонами, электронами и электромагнитным излучением Солнца приво-

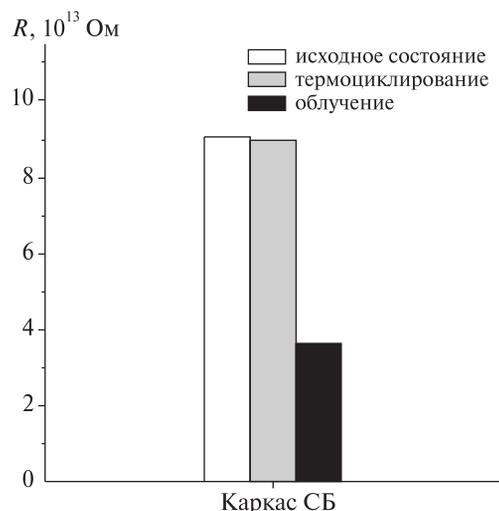


Рис. 4. Электросопротивление  $R$  каркаса панели солнечной батареи

дит к снижению в 2–3 раза общего сопротивления поверхности.

Каркас солнечных батарей представляет собой плоскую конструкцию с углепластиковыми обкладками и сотовым наполнителем на основе алюминиевой фольги; одна из углепластиковых обкладок с внешней поверхности ламинирована полиимидной пленкой марки ПМ-А. Именно на эту поверхность воздействовали корпускулярное и электромагнитное излучения. Снижение электрического сопротивления изоляции каркаса после такого воздействия связано, возможно, с проявлением в пленке полиимида суперпозиции известных для полимерных диэлектриков эффектов радиационно-индуцированной электропроводности и фотопроводимости [10]. Например, электропроводность полистирола и полиэтилентерефталата увеличивается на 3–4 порядка после рентгеновского облучения с мощностью дозы 0.4 Гр/с. Результаты измерений радиационной электропроводности полимерных диэлектриков показывают значительный разброс даже для одного и того же полимера в случаях применения разных источников облучения с различной мощностью дозы и различных модификаций технологии производства полимера [10]. В общем случае увеличение электропроводности полимерного диэлектрика

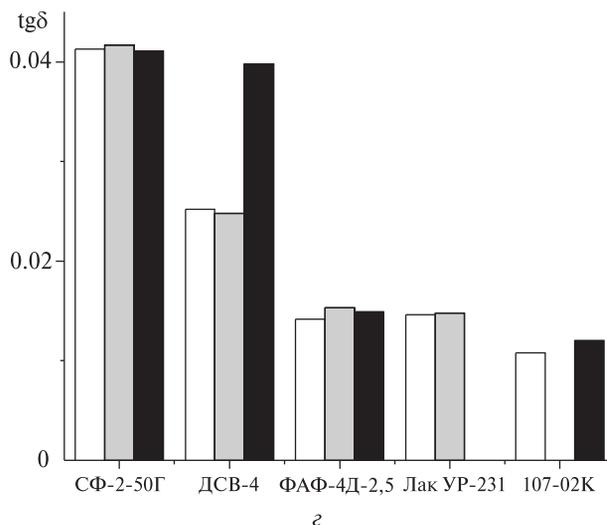
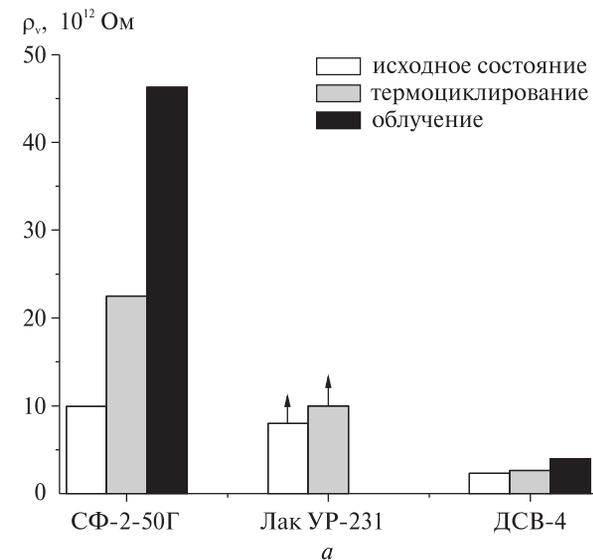
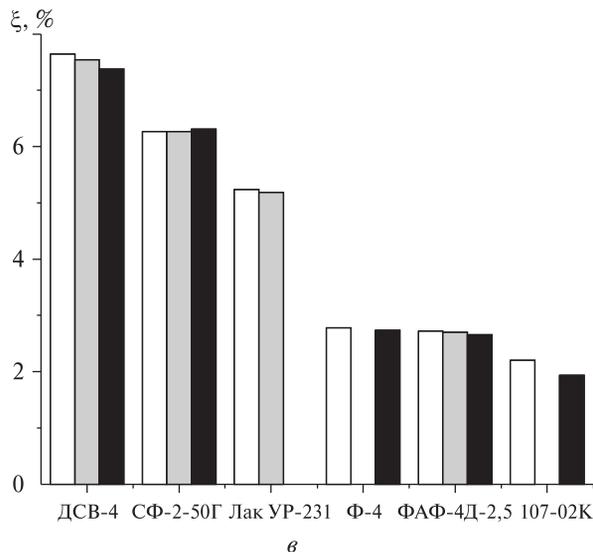
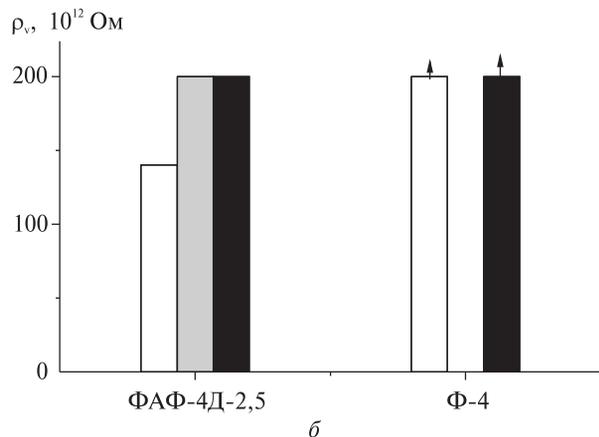


Рис. 5. Резистивные (а, б) и диэлектрические (в, г) характеристики материалов



при воздействии ионизирующего излучения обусловлено образованием, накоплением и нейтрализацией в нем избыточных заряженных частиц, способных перемещаться в направлении электрического поля.

В табл. 3 и на рис. 5 приведены результаты измерений удельного объемного сопротивления  $\rho_v$ , диэлектрической проницаемости  $\xi$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  (на частоте 1 МГц) ряда полимерных и полимерных композиционных материалов.

Из таблицы следует, что облучение и термоциклирование приводит, как правило, к заметному (1.25–4.5 раза) возрастанию удельного объемного сопротивления полимерных и полимерных композиционных материалов.

Значительно ошутимее проявилось воздействие термоциклирования в вакууме на электро-резистивные свойства полимерных композиционных материалов, представленных в табл. 4 и на рис. 6, для которых объемное и поверхностное удельное сопротивление возросло на 1.5–3 порядка.

Текстолит и гетинакс — композиты на основе органических смол, армированных тканевыми или бумажными волокнами, обработанными специальными составами поверхностно-активных веществ. Многократное термоциклическое

воздействие в вакууме приводит к возникновению циклических внутренних термонапряжений в композите, обусловленных различиями в теплофизических и упругих свойствах матрицы и армирующего элемента, что может вызвать нарушение сплошности и расслоение на границах раздела сред. Кроме того, при длительной выдержке в вакууме в процессе термоциклирования происходят газовыделение (испарение низкомолекулярных легколетучих веществ и паров воды) и потеря массы композита [6]. По-ви-

димому, эти процессы и приводят к наблюдаемому существенному возрастанию удельного объемного сопротивления полимерных композиционных материалов.

Обнаруженный эффект следует рассматривать как положительный с точки зрения увеличения электрической прочности диэлектриков и снижения величин паразитных токов утечки в электромонтажных схемах. С другой стороны, это способствует возрастанию радиационной электризации поверхности КА за счет подавле-

Таблица 3. Удельное объемное сопротивление и диэлектрические свойства

| Материал                 | Состояние               | $\rho_v, 10^{12}$<br>Ом·м | $\rho_{\text{фкл}}/\rho_{\text{исх}}$ | $\xi$ | tg $\delta$ | $\Delta\xi/\xi_{\text{исх}},$<br>% | $\Delta\text{tg}\delta/\text{tg}\delta_{\text{исх}},$<br>% |
|--------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------------------|-------|-------------|------------------------------------|--|
| Стеклотекстолит СФ-2-50Г | Исходное                | 9.9                       |                                       | 6.27  | 0.0413      |                                    |  |
|                          | После термоциклирования | 22.5                      | 2.3                                   | 6.27  | 0.0417      | -0.1                               | 1.0  |
|                          | После облучения         | 46.3                      | 4.7                                   | 6.31  | 0.0411      | 0.6                                | -0.5   |
| Фторопласт Ф-4           | Исходное                | >200*                     |                                       | 2.78  | <0.0003**   |                                    |  |
|                          | После облучения         | >200*                     |                                       | 2.74  | <0.0003**   | -1.4                               |  |
| Пресс-материал ДСВ-4     | Исходное                | 2.32                      |                                       | 7.64  | 0.0252      |                                    |  |
|                          | После термоциклирования | 2.65                      | 1.1                                   | 7.54  | 0.0248      | -1.3                               | -1.6   |
|                          | После облучения         | 3.98                      | 1.7                                   | 7.38  | 0.0398      | -3.4                               | 57.9   |
| Фторопласт ФАФ-4Д-2,5    | Исходное                | 140                       |                                       | 2.72  | 0.0142      |                                    |  |
|                          | После термоциклирования | 200                       | 1.4                                   | 2.70  | 0.0153      | -0.7                               | 7.7  |
|                          | После облучения         | 200                       | 1.4                                   | 2.66  | 0.0149      | -2.2                               | 4.9  |
| Полиэтилен 107-02К       | Исходное                |                           |                                       | 2.2   | 0.0100      |                                    |  |
|                          | После облучения         |                           |                                       | 1.94  | 0.0120      | -11.8                              | 11.1   |
| Лак УР-231               | Исходное                | 8                         |                                       | 5.24  | 0.0146      |                                    |  |
|                          | После термоциклирования | 10                        | 1.25                                  | 5.19  | 0.0148      | -1.0                               | 1.4  |

\* Сопротивление выше максимального значения, измеряемого тераомметром Е6-13А. \*\* Значение характеристики лежит в пределах погрешности измерений прибора Е7-12.

Таблица 4. Электрорезистивные характеристики полимерных композиционных материалов

| Материал               | $\rho_v, \text{Ом}\cdot\text{м}$ |                         | $\rho_{v\text{тц}}/\rho_{v\text{исх}}$ | $\rho_s, \text{Ом}/\square$ |                         | $\rho_{s\text{тц}}/\rho_{s\text{исх}}$ | $R_p, \text{Ом}$     |                         | $R_{i\text{тц}}/R_{i\text{исх}}$ |
|------------------------|----------------------------------|-------------------------|--|-----------------------------|-------------------------|--|----------------------|-------------------------|----------------------------------|
|                        | исходное состояние               | после термоциклирования |  | исходное состояние          | после термоциклирования |  | исходное состояние   | после термоциклирования |                                  |
| Текстолит А            | $1.07 \cdot 10^7$                | $4.21 \cdot 10^{10}$    | 3900                                   | —                           | —                       | —                                      | —                    | —                       | —                                |
| Гетинакс 1-1.0         | $3.86 \cdot 10^9$                | $6.72 \cdot 10^{11}$    | 170                                    | —                           | —                       | —                                      | —                    | —                       | —                                |
| Стержень текстолитовый | —                                | —                       | —                                      | $1.88 \cdot 10^{11}$        | $3.86 \cdot 10^{12}$    | 20.5                                   | $3.05 \cdot 10^{10}$ | $1.23 \cdot 10^{12}$    | 40.3                             |

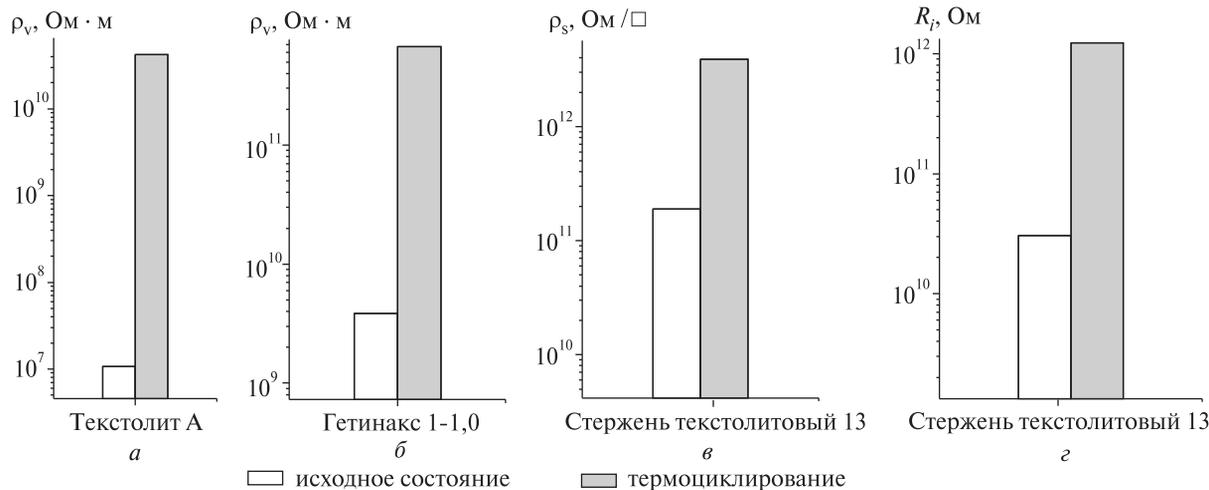


Рис. 6. Влияние термоциклирования на резистивные характеристики текстолита А (а), гетинакса 1-1.0 (б) и стержня текстолитового 13 (в, г)

ния релаксации объемных зарядов и повышает вероятность пробоя.

Данные по влиянию ФКП на диэлектрические свойства, приведенные в табл. 3, свидетельствуют о высокой радиационной стойкости исследованных материалов к заданному уровню дозовой нагрузки (относительные изменения  $\xi$  и  $\text{tg}\delta$  не превышают нескольких процентов). Исключение составляет пресс-материал ДСВ-4, для которого приращение  $\text{tg}\delta$  при совместном воздействии корпускулярного и электромагнитного излучения составило около 60 %, что может быть связано с высокой степенью радиационно-стимулированной поляризации диэлектрика.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования деградации термооптических и электрофизических свойств конструкционных и функциональных материалов, отдельных элементов конструкции микроспутника МС-2-8 в условиях, имитирующих 5-летнее пребывание аппарата на орбите высотой 670 км, с использованием методологии ускоренных испытаний указывают на перспективность применения большинства выбранных материалов в современном космическом аппаратостроении. Выбранная методика оказалась эффективной для решения задач оперативного тестирования исследованных материалов.

Результаты выполненных исследований и испытаний позволяют провести отбор материалов КА, сохраняющих необходимый уровень эксплуатационных характеристик при заданной геофизической обстановке на орбите. Кроме того, знание степени деградации исследованных свойств материалов при воздействии ФКП необходимо при математическом моделировании тепловых и электрических процессов на стадии проектирования КА.

Авторы благодарны А. М. Кислову за плодотворное обсуждение результатов работы.

1. Абраимов В. В., Негода А. А., Завалишин А. П., Колыбаев Л. К. Комплексная имитация факторов космического пространства // Космічна наука і технологія. — 1995. — 1, № 2–6. — С. 76–80.
2. Верховцева Э. Т., Яременко В. И., Теленев В. Д. Газоструйный имитатор ВУФ- и УМР-излучения Солнца и воздействие его излучения на материалы // Космічна наука і технологія. — 1998. — 4, № 2/3. — С. 102–109.
3. Гаврилов Р. В., Похил Ю. А. Исследования материалов и процессов в условиях воздействия факторов космического пространства // Космічні дослідження в Україні 2000–2002. — Киев: КИТ, 2002. — С. 85–99.
4. Гаврилов Р. В., Князев В. Д., Колыбаев Л. К. и др. Протонно-электронный инжектор в составе криогенно-вакуумного комплекса для исследования радиационной стойкости материалов // Вестник НТУ ХПИ. — 2005. — № 5. — С. 15–21.

5. *Модель космоса: В 2 т. / Под ред. М. И. Панасюка, Л. С. Новикова. — Т. 1: Физические условия в космическом пространстве. Гл. 3. — М.: КДУ, 2007.*
6. *Похил Ю. А., Гаврилов Р. В., Пристюк М. М. и др. Исследование кинетики потери массы конструкционных материалов в вакууме при воздействии радиации и температуры // Тр. III Междунар. симп. «Вакуумные технологии и оборудование» (ISVTE-4). — Харьков, 2001. — С. 380—384.*
7. *Похил Ю. А., Гаврилов Р. В., Яковенко Л. Ф. и др. Научная аппаратура и материалы для реализации космического эксперимента «Пента—Усталость» // Космічна наука і технологія. — 2006. — 12, № 1. — С. 3—11.*
8. *Соловьев Г. Г., Новиков Л. С. Изменение оптических свойств терморегулирующих покрытий под воздействием факторов космического пространства // Модель космоса: В 2 т. / Под ред. М. И. Панасюка, Л. С. Новикова. — Т. 2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. — М.: КДУ, 2007. — С. 595—614.*
9. *Фаворский О. Н., Каданер Я. С. Вопросы теплообмена в космосе. — М.: Высш. шк., 1972. — 280 с.*
10. *Хатинов С. А. Радиационная электропроводность полимеров // Модель космоса: В 2 т. / Под ред. М. И. Панасюка, Л. С. Новикова. — Т. 2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. — М.: КДУ, 2007. — С. 361—376.*
11. *Шувалов В. А., Кочубей Г. С., Приймак А. И., Письменный Н. И. Потери мощности солнечных батарей выскоорбитальных космических аппаратов из-за воздействия околоспутниковой среды // Космічна наука і технологія. — 2004. — 10, № 4. — С. 39—49.*
12. *Шувалов В. А., Приймак А. И., Губин В. В. Моделирование радиационной электризации космических аппаратов в ионосфере и магнитосфере // Космічна наука і технологія. — 1998. — 4, № 5/6. — С. 28—35.*

*Надійшла до редакції 02.10.09*

*Yu. A. Pokhyl, V. V. Abramov, G. I. Saltevsij, I. P. Zaritskij, V. A. Lototskaya, A. V. Krevsun, N. N. Agashkova, M. M. Pristjuk, V. G. Tikhij, I. A. Gusarova, A. M. Potapov*

#### THE EFFECT OF ON-GROUND SIMULATED SPACE FACTORS ON THERMOOPTICAL AND ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF SPACE VEHICLE MATERIALS

We investigate the space factor action on changes of thermo-optical and electrophysical characteristics of some non-metallic structural and functional materials of external surfaces of the space vehicle MC-2-8. The procedure of the accelerated laboratory simulation of five-year space flight of the space vehicle in a Sun-synchronous orbit of an altitude of 670 km is used. An experimental estimation of stability of the materials under the integral effect of vacuum, electrons and protons of the Earth radiation belts, solar electromagnetic radiation, cyclic orbital temperature changes is performed.