

УДК 629.783.06-533.6

Ю. В. Петров¹, Б. М. Рассмакин²,
Т. А. Таранова¹, В. С. Хорошилов¹

¹Державне конструкторське бюро «Південе» ім. М. К. Янгеля, Дніпропетровськ

²Національний технічний університет України (Київський політехнічний інститут)

Оценка влияния на тепловой режим КА отклонений от номинальных значений теплофизических параметров

Доповідь на конференції 05.09.05

Обрунтовано необхідність точної інформації про реальні значення теплофізичних параметрів для КА з пасивною системою терморегулювання. За даними телеметричної інформації від давачів температури на КА АУОС-СМ-КФ методом розв'язку оберненої задачі проведено аналіз деградації чорної емалі АК-512 і визначено ефективну теплопровідність стільникової панелі та вбудованих у неї теплових труб.

На микроспутниках, получивших в последнее время широкое распространение, тепловой режим обеспечивается в основном с помощью пассивных средств терморегулирования, к которым относятся терморегулирующие покрытия с заданными значениями оптических коэффициентов A_s и ε , тепловые трубы, чехлы из экранно-вакуумной изоляции, тепловые изоляторы и др.

Реализация пассивного терморегулирования возможна только при условии неизменности (или незначительном изменении) теплофизических характеристик средств терморегулирования в течение всего срока эксплуатации на орбите.

В наземных условиях исследование изменения значений оптических коэффициентов терморегулирующих покрытий (ТРП) проводилось на специальных установках с имитацией воздействия отдельных факторов космического пространства.

Наиболее достоверную информацию о стойкости элементов пассивного терморегулирования к комплексному воздействию факторов космического пространства можно получить при прове-

дении натурных испытаний. Исследования образцов покрытий, проведенные на станции «Мир» (для орбит до 400 км), показали, что коэффициент поглощения солнечного излучения A_s на черной эмалі АК-512 уменьшается со временем. На более высоких орбитах исследования деградации черных покрытий и эффективной теплопроводности труб до настоящего времени не проводились.

Поэтому на раме блока панелей КА АУОС-СМ-КФ была установлена экспериментальная сотопанель со встроенными тепловыми трубами [1], на обе поверхности которой наносилось ТРП — черная эмаль АК-512. На панели установлено четыре датчика температуры, по показаниям которых можно судить о деградации ТРП и эффективной теплопроводности тепловых труб.

Кроме того, с течением времени в паровой полости труб под воздействием процессов химического взаимодействия теплоносителя с материалом труб, а также жесткого рентгеновского излучения могут выделяться неконденсирующи-

еся газы, которые приводят к ухудшению эффективной теплопроводности труб. В ходе эксперимента по показаниям датчиков температуры также можно определить и степень изменения эффективной теплопроводности труб.

КА АУОС-СМ-КФ запущен 31.07.01 на круговую орбиту с минимальной высотой 505 км и максимальной высотой 544 км; наклонением 82.5°; точностью ориентации базовой оси на центр диска Солнца — не хуже 10°; нормалью к рабочей поверхности сотовой панели, направленной на Солнце с точностью $\pm 2^\circ$.

Узкий диапазон значений в изменении ориентации сотовой панели позволяет с достаточной достоверностью рассчитывать падающие на ее поверхность тепловые потоки от Солнца, благодаря чему с высокой степенью точности можно определять значения оптических коэффициентов поверхностей панели.

В ходе эксперимента решались две задачи.

1. Определение деградации оптических коэффициентов терморегулирующего покрытия — эмали АК-512 черной.

2. Определение эффективной теплопроводности и стабильности тепловых труб в условиях невесомости в течение всего срока эксплуатации.

Устанавливаемая на КА АУОС-СМ-КФ сотовая панель с размерами в плане 495×492 мм состоит из сот и обшивок. В качестве обшивок использованы алюминиевые листы толщиной 0.4 мм. Соты выполнены из алюминиевой фольги толщиной 30 мкм. Ячейки сот шестигранные со сторонами 5 мм. Глубина ячейки сот 40 мм. Толщина сотовой панели 41 мм.

Наружная поверхность сотовой панели покрыта черной эмалью АК-512 с начальными значениями оптических коэффициентов рабочей и тыльной поверхностей $A_s = 0.98$ [2] и $\varepsilon = 0.75$.

Рабочая сторона сотовой панели закрыта экраном ЭВТИ, в котором находятся два выреза размерами 120×150 мм. С тыльной стороны сотовой панели установлен экран ЭВТИ размером 248×180 мм. Местоположение экранов ЭВТИ и вырезов в них показано на рис. 1.

Внутри сотовой панели установлены две тепловые трубы, приклеенные к рабочей (солнечной) обшивке сотовой панели. Для контроля температуры обшивок на сотовой панели установлены четыре датчика температуры:

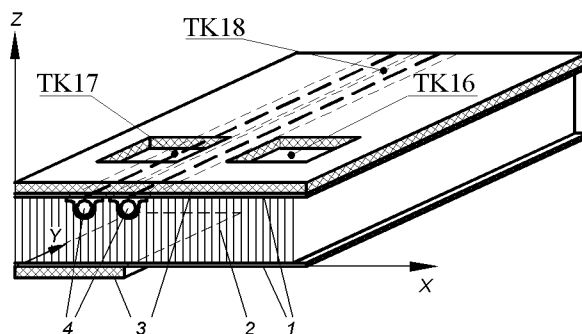


Рис. 1. Конструкция приборной сотовой панели и ее компоненты: 1 — обшивка, 2 — сотозаполнитель, 3 — экранно-вакуумная тепловая изоляция (ЭВТИ), 4 — тепловая труба, ТК16, ТК17, ТК18 — датчики температуры

Таблица 1. Масса и теплоемкость элементов конструкции

Наименование	Количество	м, г	Удельная теплоемкость с, Дж/(кг·К)
Рабочая сторона сотовой панели (с учетом тепловых труб)	1	790	900
Тыльная сторона сотовой панели	1	520	900
Боковые грани:			
левая и правая	2	410	900
передняя и задняя	2	430	
Экран ЭВТИ:			
над рабочей стороной	1	350	1047
над тыльной стороной	1	15.8	

- ТК16, ТК17, ТК18 — на рабочей поверхности обшивки (два из них вдоль труб);
- ТК15 — на тыльной поверхности обшивки.

При этом датчики ТК15 и ТК16 предназначены для определения перепада температур по толщине сотовой панели, а датчики ТК17 и ТК18 — по длине участков сотовой панели с трубами.

Масса и теплоемкость элементов конструкции приведены в табл. 1.

Для расчета теплового режима сотовой панели и оценки влияния изменения оптических коэффициентов на температуры сотовой панели была разработана геометрическая и тепловая математическая модель.

При разработке математической модели учитывается теплоподвод от внешних источников тепла, излучение тепла в окружающее про-

странство, перетекание его по сотам и обшивкам, а также переизлучение между обшивками.

Особое влияние на перепад температур между обшивками сотовой панели оказывает эффективное термическое сопротивление за счет теплопроводности по толщине сотовой панели, которое определяется из соотношения

$$R_z = 2R_{\text{обш}} + 2R_{\text{кл}} + R_{\text{сот}}, \quad (1)$$

где

$$R_{\text{обш}} = \frac{\ln(D/d)}{\lambda_{\text{обш}} 2\pi h_{\text{обш}}}$$

— термическое сопротивление обшивки, D и d — диаметры начала и конца передачи тепла участка обшивки, $\lambda_{\text{обш}}$ — теплопроводность обшивки, $h_{\text{обш}}$ — толщина обшивки, $R_{\text{кл}} = \delta_{\text{кл}} / (\lambda_{\text{кл}} F_{\text{кл}})$ — термическое сопротивление клеевого соединения, $\delta_{\text{кл}}$ — толщина клеевого соединения, $\lambda_{\text{кл}}$ — теплопроводность клея, $F_{\text{кл}} = nba\delta_{\text{ф}}$ — площадь контакта клея с сотой, n — количество сот на расчетном участке, a — сторона соты, $\delta_{\text{ф}}$ — толщина фольги, $R_{\text{сот}} = h_{\text{сот}} / (\lambda_z^{\text{эф}} F_{\text{уч}})$ — термическое сопротивление по сотозаполнителю, $h_{\text{сот}}$ — толщина сотозаполнителя, $\lambda_z^{\text{эф}} = \lambda_{\text{сот}} \frac{8\sqrt{3}}{9} \frac{\delta_{\text{ф}}}{a}$ — эффективная теплопроводность сотозаполнителя, $\lambda_{\text{сот}}$ — теплопроводность сотозаполнителя, $F_{\text{уч}}$ — площадь поверхности касания сот с обшивкой.

Подставляя в выражение (1) численные значения коэффициентов:

$$\begin{aligned} D &= 4.6 \text{ см}, \quad d = 2 \text{ см}, \quad \lambda_{\text{обш}} = 117 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \text{К}^{-1}, \\ h_{\text{обш}} &= 4 \text{ мм}, \quad \delta_{\text{кл}} = 81.7 \text{ мкм}, \quad \lambda_{\text{кл}} = 0.5 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \text{К}^{-1}, \\ n &= 8, \quad a = 5 \text{ мм}, \quad \delta_{\text{ф}} = 30 \text{ мкм}, \quad F_{\text{кл}} = 7.2 \text{ мм}^2, \\ h_{\text{сот}} &= 4.1 \text{ см}, \quad \lambda_{\text{сот}} = 155 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \text{К}^{-1}, \quad \lambda_z^{\text{эф}} = 1.43, \end{aligned}$$

получим

$$\begin{aligned} R_{\text{обш}} &= 0.283 \text{ К/Вт}, & R_{\text{кл}} &= 22.717 \text{ К/Вт}, \\ R_{\text{сот}} &= 54 \text{ К/Вт}, & R_z &= 100 \text{ К/Вт}. \end{aligned}$$

Расчеты по выбранной модели проводились для условий внешнего теплоподвода, которые соответствовали дате 07.11.2003 г. (по истечению 27 месяцев после запуска КА). Условия внешнего теплоподвода определялись по баллистическим параметрам на период с 03.11.2003 по 11.11.2003 гг.

Таблица 2. Значения оптических коэффициентов на поверхностях основных расчетных узлов: A_s — коэффициент поглощения солнечного излучения в видимом диапазоне, ε — степень черноты

Поверхность	A_s	ε	Покрытие
Наружная поверхность сотовой панели	0.95...0.98	0.75	эмаль АК-512
Наружная поверхность датчиков температуры	0.6	0.5	полиимидная пленка
Экран ЭВТИ	0.7	0.8	ткань капроново-каркасная
Боковые грани сотовой панели	0.6	0.8	Ан. Окс. упл.

Для определения более полного совпадения расчетных значений температуры сотовой панели с данными ТМ-информации расчеты проводились для нескольких значений коэффициентов поглощения солнечного излучения $A_s = 0.95...0.98$. Значения оптических коэффициентов на поверхностях основных расчетных узлов приведены в табл. 2. Изменение температуры в течение витка для датчиков температуры ТК15, ТК16, ТК17 и ТК18 представлено на рис. 2. Значения теплофизических характеристик сотовой панели со встроенными тепловыми трубами определялись с использованием телеметрической информации по датчикам температуры ТК15-ТК18, представленной на рис. 3. Видно, что наилучшее совпадение температур соответствует $A_s = 0.98$ (рис. 4). Это свидетельствует об отсутствии деградации терморегулирующего покрытия АК-512 черного на орбитах высотой свыше 500 км за 27 месяцев эксплуатации.

Эффективную теплопроводность участка сотовой панели с тепловыми трубами можно определить из уравнения теплового баланса:

$$\begin{aligned} A_s S_0 F_{\text{п}} \cos(n, \hat{s}) - \varepsilon \sigma F_{\text{п}} T_{\text{К17}}^4 - \\ - \frac{\lambda}{\delta} F_{\text{сп}} (T_{\text{К17}} - T_{\text{К18}}) = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где A_s — коэффициент поглощения солнечного излучения, S_0 — солнечная постоянная, n, \hat{s} — угол между нормалью к поверхности сотовой панели и направлением на Солнце, ε — степень черноты, σ — постоянная Стефана — Больцмана, $T_{\text{К17}}, T_{\text{К18}}$ — температуры участков сотовой панели

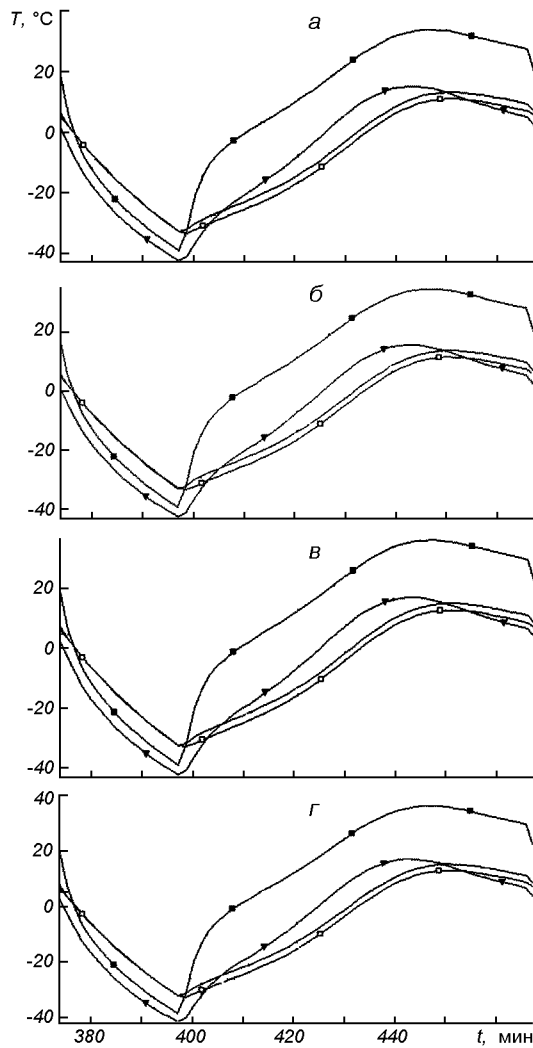


Рис. 2. Изменение температуры в течение витка для $A_s = 0.98$ (а), 0.97 (б), 0.96 (в), 0.95 (г)

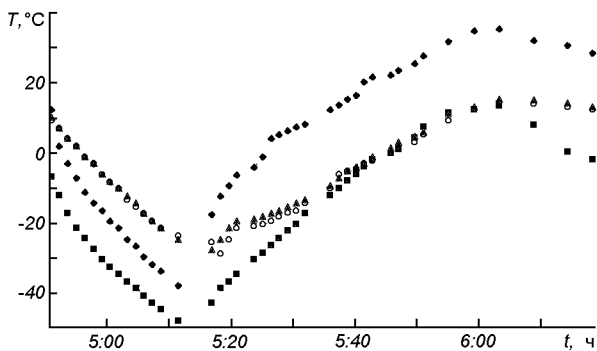


Рис. 3. Изменение температуры датчиков ТК15, ТК16, ТК17 и ТК18 по данным ТМ-информации

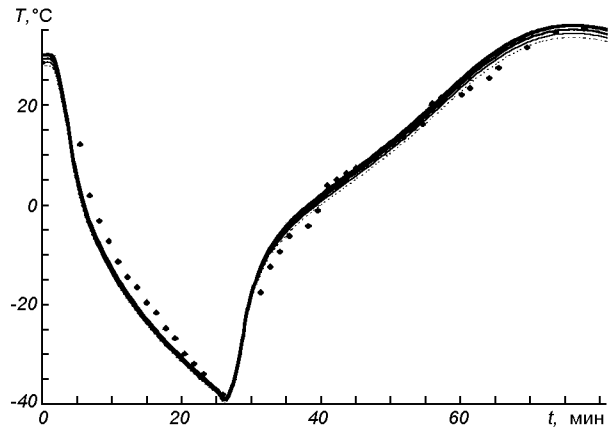


Рис. 4. Изменение температуры датчика ТК16 в течение витка для $A_s = 0.95...0.98$

Таблица 3. Значения T_{K17} и T_{K18} по данным ТМ-информации

Дата	Номер витка	Температура датчика ТК17, °C	Температура датчика ТК18, °C	ΔT , °C	λ , Вт/(м·К)
31.07.2001	13	15.66	14.61	1.05	2755.6
10.10.2001	1292	16.1	15.06	0.95	2989.6
23.11.2001	2118	17.33	16.31	1.02	2816.9
17.05.2002	4675	21.43	20.4	1.03	2744.3
27.01.2003	8841	14.59	13.57	1.02	2849.7

зоны испарения и конденсации тепловой трубы соответственно, λ — эффективный коэффициент теплопроводности, F_n — площадь подвода и отвода тепла, δ — длина транспортной зоны (расстояние между датчиками температуры), F_{cp} — поперечное сечение транспортной зоны.

Решая уравнение (2) относительно λ , получим

$$\lambda = \frac{A_s S_0 F_n \cos(n, \hat{s}) - \varepsilon \sigma F_n T_{K17}^4}{(F_{cp} / \delta) (T_{K17} - T_{K18})}. \quad (3)$$

Значения T_{K17} и T_{K18} представлены в табл. 3.

Подставляя в (3) значения коэффициентов $A_s = 0.98$, $S_0 = 1400$ Вт/м², $F_n = 0.0081$ м², $\varepsilon = 0.75$, $\delta = 29.7$ см, $F_{cp} = 0.00084$ м², $\sigma = 56.7$ нВт·м⁻²·К⁻⁴, определим величину эффективной теплопроводности λ для различных значений ΔT , приведенные в табл. 3. Как видно, значения эффективной теплопроводности тепло-

вых труб, вычисленные для разных сроков эксплуатации их на орбите, отличаются незначительно — не более 8 %, что свидетельствует о высокой стабильности теплопроводящей способности труб.

Незначительные расхождения значений эффективной теплопроводности могут быть объяснены погрешностью показаний датчиков температуры, которая по результатам измерения температур на технической позиции при подготовке КА АУОС-СМ-КФ к пуску составила не более 0,8 °С.

1. Рассамкин Б. М., Тарасов Г. В., Хайрмасов С. М. и др. Моделирование и анализ результатов наземных и летных испытаний сопанели с тепловыми трубами на космическом аппарате АУОС-СМ-КФ // Научно-техн. сб. «Космическая техника. Ракетное вооружение». — Днепропетровск: ГKB «Южное», 2004.—С. 264—276.

2. Silverman E. M. Space environmental effects on spacecraft: LEO materials selection guide // Progress Rep. — 1995.— P. 1099—10101. (TRW Space and Electronics Group, Redondo Beach, California. Contract NAS1-19291. April 1993 through March 1995).

ESTIMATE OF THE INFLUENCE OF THERMOPHYSICAL PARAMETER DEVIATIONS ON SC THERMAL REGIME

Yu. V. Petrov, B. M. Rassamakin, T. A. Taranova
V.S.Khoroshylov

The necessity of accurate information on actual values of thermophysical properties for the SC with passive thermal control system is substantiated. On the basis of the telemetry information from the temperature sensors of the AUOS-SM-KF SC, the degradation of black enamel AK-512 is analyzed using inverse-scattering method as well as effective thermal conductivity of honeycomb panel and embedded heat-pipes is estimated.