

ТЕМПЕРАТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ И ОЦЕНКА ОТКЛОНЕНИЯ ФОРМЫ СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ КАЛИБРОВОЧНОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА ТЕНЕВОМ УЧАСТКЕ ОКОЛОЗЕМНОЙ ОРБИТЫ*

В. С. Зарубин, В. Н. Зимин, Г. Н. Кувыркин

*Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана,
г. Москва, Российская Федерация*

Представлена комплексная математическая модель, описывающая изменение формы сферической оболочки калибровочного космического аппарата, вызванное неравномерным распределением температуры по ее поверхности на теневом участке околоземной орбиты. Тепловая часть модели учитывает воздействие на оболочку собственного излучения поверхности Земли и радиационный теплообмен в полости оболочки. Неравномерность облучения поверхности оболочки приводит к неравномерности распределения ее температуры и, как следствие, к отклонению ее формы от сферической, что может повлиять на функциональные характеристики аппарата. Для определения искажения сферической формы оболочки использованы основные положения безмоментной теории оболочек вращения. Количественный анализ представленной модели проведен для установившегося неравномерного распределения температуры по поверхности оболочки, возникающего на различной высоте расположения аппарата над поверхностью Земли. Полученные оценки искажения формы оболочки калибровочного космического аппарата могут быть использованы для сопоставления с допустимыми отклонениями, не нарушающими его функциональные характеристики на теневом участке околоземной орбиты.

Ключевые слова: калибровочный космический аппарат, сферическая оболочка, излучение поверхности Земли, радиационный теплообмен.

Введение

Калибровочные космические аппараты (ККА) применяют для оценки и контроля энергетического потенциала радиолокационного канала наземного комплекса мониторинга движения космических объектов [1; 2]. Распространенным вариантом геометрической формы ККА, называемого также калибровочно-юстировочным, является выполненная с высокой точностью сферическая оболочка. Аналогичную форму имеют пассивные ретрансляторы сигналов и используемые в целях калибровки и юстировки радиолокационной аппаратуры некоторые типы малоразмерных эталонных отражателей [1; 3], а также крупно-размерные надувные конструкции [4–6].

Орбиты ККА могут быть как круговыми с высотой около 1000 км, в том числе близкими к полярным, так и эллиптическими с апогеем до 2200 км [2; 3]. Основным фактором, влияющим на форму оболочки ККА, является распределение температуры по ее поверхности, зависящее от солнечного излучения и собственного излучения Земли [7; 8]. На теневом участке околоземной орбиты температурное состояние оболочки ККА наряду с собственным излучением Земли в некоторой степени может зависеть от энергии соударения с молекулами и атомами атмосферных газов и рекомбинации этих молекул [9]. На высоте 300 км над поверхностью Земли оценки плотности локальных тепловых потоков, вызванных этими процессами, не превышают 10 % от плотности потока излучения Земли, а на высоте более 350 км составляют менее 1 % [10].

Оболочку ККА выполняют из полимерной пленки толщиной несколько десятков микрометров, покрытой тонким слоем (толщиной несколько нанометров) напыленного алюминия [11].

© Зарубин В. С., Зимин В. Н.,
Кувыркин Г. Н., 2018

* Работа выполнена в рамках государственных заданий Минобрнауки РФ (проекты 9.7784.2017/БЧ и 9.24.22.2017/ПЧ)

После вывода ККА на околоземную орбиту оболочка принимает сферическую форму путем наполнения ее газом при сравнительно невысоком давлении. При этом возможно получить сферическую оболочку достаточно большого диаметра, что характерно для современных тенденций разветвления на орбите крупногабаритных трансформируемых конструкций [12].

Для орбиты ККА с теневым участком в силу периодической смены интенсивности облучения оболочки происходит существенное изменение ее температурного состояния. Это приводит не только к периодическому изменению формы оболочки, но может повлиять на ресурс работоспособности ее материала в силу циклического термомеханического воздействия. Количественный анализ термомеханического состояния оболочки ККА может быть проведен методами математического моделирования [13], используя ее тепловую модель [9] и определяющие соотношения для безмоментной сферической оболочки [14].

Условия облучения оболочки

Интенсивность собственного излучения Земли, определяющего температурное состояние оболочки ККА на теневом участке орбиты, зависит от температуры участков поверхности Земли, влажности и температуры атмосферы и от состояния облачного покрова [15]. Плотность потока собственного излучения различных участков поверхности Земли, измеренная опико-электронными приборами, установленными на орбитальной обсерватории, имеет существенный разброс и достигает значения 357 Вт/м^2 [16]. Для экваториальной области Земли в летний период плотность этого потока составляет от 175 (при сплошной облачности с верхней границей на высоте 9 км) до 247 Вт/м^2 при отсутствии облаков, а для участков в зоне северного полярного круга при тех же условиях от 145 до 225 Вт/м^2 [17].

Среднее значение плотности потока собственного излучения Земли можно оценить из условия ее радиационного баланса по формуле [10; 15] $q_0 = q_s (1 - \alpha_s) / 4$, где q_s – солнечная постоянная для среднего расстояния Земли от Солнца (по рекомендации Всемирного центра радиационного мониторинга (Давос, Швейцария) $q_s = 1368 \text{ Вт/м}^2$), α_s – альбедо Земли (среднее значение коэффициента отражения солнечного излучения поверхностью Земли). Однако значение q_s (несмотря на принятое название этой величины) не является строго постоянным. Интенсивность солнечного излучения зависит от текущего состояния поверхности Солнца и от положения Земли на ее эллиптической орбите при движении вокруг Солнца (эксцентриситет этой орбиты $\approx 0,0167$). Многолетние наблюдения показали, что изме-

нения солнечной активности слабо влияют на значение q_s , вызывая отклонения в пределах 1 %, тогда как влияние положения Земли на ее орбите более существенно.

С изменением расстояния L от Солнца плотность потока солнечного излучения изменится пропорционально квадрату отношения L_0/L , где $L_0 \approx 1,49 \cdot 10^8 \text{ км}$ – среднее расстояние Земли от Солнца. Поэтому даже при достаточно малом эксцентриситете орбиты Земли в перигелии $q_s = 1414 \text{ Вт/м}^2$, а в афелии – 1322 Вт/м^2 [10; 18]. В инженерных расчетах в случаях, когда увеличение может ухудшить характеристики КА или повлиять на его работоспособность, обычно принимают завышенное значение q_s (например, 1420 Вт/м^2 [19] и 1400 Вт/м^2 [20]). Для последующих числовых расчетов температурного состояния оболочки ККА примем значение $q_s = 1420 \text{ Вт/м}^2$. Тогда при среднем значении $\alpha_s = 0,37$ [18] из условия радиационного баланса Земли получим $q_0 \approx 215 \text{ Вт/м}^2$.

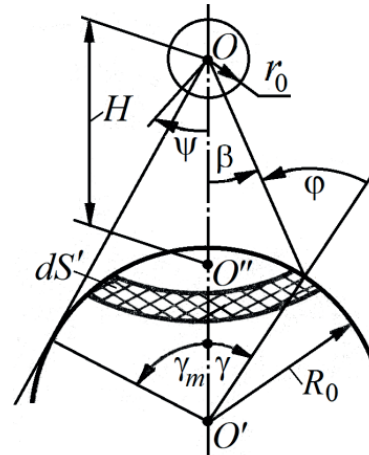


Рис. 1. Расчетная схема

При наблюдении с Земли угловой размер ККА даже при радиусе r_0 его сферической оболочки порядка 10 м начиная с высоты $H = 200 \text{ км}$ аппарата над поверхностью Земли не превышает $\delta = 10^{-4}$ рад. Поэтому при заданном значении H (расстояние между точками O и O'' на рис. 1) можно считать, что на оболочку ККА падает собственное излучение Земли с участка ее поверхности, площадь которого зависит от угла

$$\gamma_m = \arccos(1/(1+\eta)),$$

где $\eta = H/R_0$, $R_0 \approx 6371 \text{ км}$ – средний радиус поверхности Земли. Выделим на этом участке поверхности кольцевой слой бесконечно малой ширины $R_0 d\gamma$ ($\gamma \in [0; \gamma_m]$) площадью

$$dS' = 2\pi R_0^2 \sin \gamma d\gamma$$

(на рис. 1 этот слой заштрихован).

Пренебрежимо малое значение δ позволяет положить угол φ между нормалью к выделенному кольцевому слою и направлением на различные участки поверхности оболочки равным $\beta + \gamma$,

а квадрат расстояния между этим слоем и ККА равным.

$$l^2 = R_0^2(1 + (1 + \eta)^2 - 2(1 + \eta)\cos\gamma).$$

Если принять, что распределение по отдельным направлениям излучения с поверхности Земли определяется законом Ламберта [21], то суммарный поток этого излучения, падающий на поверхность оболочки ККА, составит [9]:

$$Q = 2\pi r_0^2 q_0 (1 - \sqrt{\eta(2 + \eta)} / (1 + \eta))$$

Но распределение $q'(\psi)$ плотности потока этого излучения по поверхности оболочки будет неравномерным, зависящим от угла ψ , отсчитываемого от ближайшей к поверхности Земли точки на ее поверхности (рис. 1) вдоль любой дуги большого круга радиусом r_0 , проходящей через эту точку, в которой плотность потока будет равна [9] $q'_0 = q'(0) = q_0 / (1 + \eta)^2$.

С возрастанием угла ψ функция $q'(\psi)$ убывает и в соответствии с принятым выше допущением о возможности пренебречь угловым размером оболочки примет нулевое значение при $\psi_m = \pi - \gamma_m$, т. е. $q'(\psi_m) = 0$ и, кроме того, $dq'(\psi)/d\psi|_{\psi=\psi_m} = 0$. Из симметрии распределения $q'(\psi)$ относительно прямой $O'O$ следует $dq'(\psi)/d\psi|_{\psi=0} = 0$. Этим условиям удовлетворяет аппроксимирующее соотношение

$$q'(\psi) = q'_0 \cos^2 \frac{\pi\psi}{2\psi_m} + q'_1 \sin^2 \frac{\pi\psi}{\psi_m}, \quad (1)$$

в котором коэффициент q'_1 найдем из баланса потоков падающего излучения в виде равенства

$$Q = 2\pi r_0^2 (q'_0 I_0 + q'_1 I_1),$$

где

$$I_0 = \int_0^{\psi_m} \cos^2 \frac{\pi\psi}{2\psi_m} \sin\psi d\psi = \frac{1 - \cos\psi_m - 2(\psi_m/\pi)^2}{2 - 2(\psi_m/\pi)^2}$$

$$I_1 = \int_0^{\psi_m} \sin^2 \frac{\pi\psi}{2\psi_m} \sin\psi d\psi = 2 \frac{1 - \cos\psi_m}{4 - (\psi_m/\pi)^2}$$

В итоге получим

$$q'_1 = q_0 \frac{4 - (\psi_m/\pi)^2}{2(1 - \cos\psi_m)}$$

$$\cdot \left(1 - \frac{\sqrt{\eta(2 + \eta)}}{1 + \eta} - \frac{1 - \cos\psi_m - 2(\psi_m/\pi)^2}{2(1 + \eta)^2(1 - (\psi_m/\pi)^2)} \right)$$

Так как $\psi_m = \pi - \gamma_m = \pi - \arctg\sqrt{\eta(2 + \eta)}$ и $\cos\psi_m = -\cos\gamma_m = -1/(1 + \eta)$, отношения

$$\bar{q}(0) = q'(0)/q_0, \quad \bar{q}_1 = q'_1/q_0 \quad \text{и} \quad \bar{Q} = Q/(\pi r_0^2 q_0)$$

и угол ψ_m можно представить функциями лишь одного аргумента η (рис. 2). На рис. 3 построены рассчитанные с использованием формулы (1) графики зависимости от отношения $\bar{\Psi} = \Psi/\psi_m$ относительной плотности $\bar{q}(\bar{\Psi}) = q'(\Psi)/q_0$ падающего на поверхность оболочки собственного излучения поверхности Земли для различных значений параметра η .

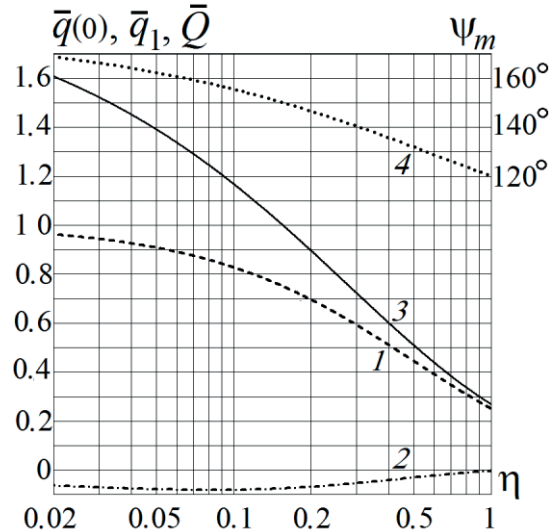


Рис. 2. Графики зависимостей от параметра η : 1 — $\bar{q}(0)$; 2 — \bar{q}_1 ; 3 — \bar{Q} ; 4 — ψ_m

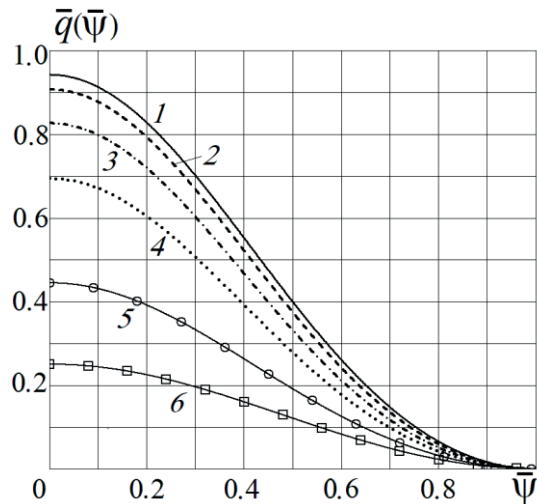


Рис. 3. Графики зависимостей $\bar{q}(\bar{\Psi})$ от отношения $\bar{\Psi} = \Psi/\psi_m$ при различных значениях параметра η : 1 — 0,03; 2 — 0,05; 3 — 0,1; 4 — 0,2; 5 — 0,5; 6 — 1

Температурное состояние сферической оболочки

Оценки термического сопротивления оболочки из тонкой алюминированной полимерной пленки в направлении нормали к поверхности по-

казывают, что температуру оболочки можно принять однородной по ее толщине. Действительно, оболочка из каптона [11], аналогом которого является полиимидная пленка ПМФ-352 с двусторонним покрытием политетрафторэтиленом (тефлоном) [22; 23] с коэффициентом теплопроводности $\lambda = 0,17$ Вт/(м·К), при толщине $h = 30$ мкм имеет весьма малое термическое сопротивление $h/\lambda \approx 1,8 \cdot 10^{-4}$ м²·К/Вт. Слой напыленного алюминия толщиной $h' = 10$ нм при коэффициенте теплопроводности $\lambda' = 206$ Вт/(м·К) [24] обладает термическим сопротивлением $h'/\lambda' \approx 5 \cdot 10^{-11}$ м²·К/Вт. Даже при завышенной оценке в 200 Вт/м² возможного значения плотности теплового потока, проходящего через оболочку, получим также завышенную оценку перепада температуры по толщине оболочки, не превышающую 0,04 К.

Эффективный коэффициент теплопроводности оболочки в тангенциальных направлениях, оцениваемый по формуле $\lambda_* = (\lambda h + \lambda' h') / (h + h')$ составит не более 0,18 Вт/(м·К). Это позволяет при формировании тепловой модели оболочки не учитывать перенос тепловой энергии путем теплопроводности вдоль поверхности оболочки. Малое значение полной теплоемкости оболочки позволяет считать ее температурное состояние установившимся при движении ККА на теновом участке орбиты.

Собственное излучение Земли относится к инфракрасной части спектра и для средней температуры излучающей поверхности Земли, оцениваемой значением 288 К, наибольшая интенсивность этого излучения соответствует, согласно закону Вина [21], длине волны около 10 мкм. При близких к указанному значению температурах допустимо считать коэффициент A' поглощения излучения поверхностью равным ее коэффициенту ε' излучения, часто называемому «степенью черноты».

Материал оболочки примем непрозрачным для излучения. Свойства внутренней поверхности оболочки примем соответствующими модели диффузно-серой поверхности [21], что позволяет считать равными коэффициенты A поглощения и ε излучения этой поверхности. Все упомянутые оптические характеристики внешней и внутренней поверхности оболочки полагаем неизменными на каждой из поверхностей. При наличии в оболочке оборудования ККА считаем, что занимаемый им объем достаточно мал. Это дает возможность при анализе переноса излучения внутри оболочки не учитывать возможного взаимного затенения участков ее внутренней поверхности. Отсюда следует, что при осесимметричном относительно прямой $O'O$ (рис. 1) распределении плотности падающего собственного излучения Земли искомое установившееся распределение температуры в оболочке также долж-

но быть осесимметричным, описываемым функцией $T(\psi)$ лишь одного аргумента ψ . Поскольку давление газа в полости оболочки ККА диаметром даже порядка метра не превышает значения в 10 Па [7], а для более крупных оболочек имеет еще меньшее значение, переносом тепловой энергии в этой полости за счет теплопроводности газа (даже в случае использования высокотеплопроводного гелия) можно пренебречь и учитывать теплоперенос лишь путем излучения.

Принятые допущения позволяют перейти к рассмотрению модели непрозрачной для излучения сферической оболочки нулевой толщины радиусом r_0 , равным радиусу средней поверхности реальной оболочки ККА. Двумя близкими сечениями, перпендикулярными прямой $O'O$ (рис. 1), выделим из такой условной оболочки кольцевую полосу, положение которой характеризует угол ψ . Ее внешняя поверхность поглощает часть $A'q'(\psi)$ потока, падающего на оболочку излучения Земли плотностью $q'(\psi)$, и испускает поток собственного излучения плотностью $\varepsilon'\sigma_0 T^4(\psi)$, где $\sigma_0 \approx 5,6693 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К) – постоянная Стефана-Больцмана. Разность плотностей этих потоков составляет плотность $q^*(\psi)$ результирующего излучения с внутренней поверхности этой полосы, поступающего в полость оболочки. Тогда уравнение баланса потоков для единичной площадки внешней поверхности кольцевой полосы можно представить в виде

$$A'q'(\psi) - \varepsilon'\sigma_0 T^4(\psi) = q^*(\psi). \quad (2)$$

В силу вогнутости внутренней поверхности оболочки на рассматриваемую полосу от соседних кольцевых полос падает поток излучения плотностью q^* . Часть Aq^* этого потока поглощается, а часть $(1 - A)q^*$, отражаясь, снова поступает в полость оболочки (коэффициенты поглощения и отражения для непрозрачной оболочки в сумме составляют единицу). Особенность полости сферической оболочки состоит в том, что для нее $q^* = \text{const}$ [7–9] т.е. не зависит от угла ψ . В данном случае при $\varepsilon' = A'$ имеем

$$q_* = \bar{q}' = Q / (4\pi r_0^2)$$

– среднее по внешней поверхности оболочки значение плотности потока падающего на нее излучения Земли. В итоге уравнение баланса тепловых потоков для единичной площадки внутренней поверхности кольцевой полосы примет вид

$$A\bar{q}' + q^*(\psi) = \varepsilon\sigma_0 T^4(\psi) \quad (3)$$

Исключив из соотношений (2) и (3) величину q^* , при $\varepsilon = A$ получим формулу

$$T^4(\psi) = (A\bar{q}' + A'q'(\psi)) / ((A + A')\sigma_0), \quad (4)$$

определяющую установившееся распределение температуры по поверхности оболочки. Из этой формулы, в частности, следует, что температура участка оболочки при $\psi \geq \psi_m$, на которую не падает излучение Земли, не зависит от угловых координат. Эту температуру определяют параметр η и значения A и A' .

Оценка отклонения формы оболочки от сферической

Оболочку ККА при неизменной по ее толщине температуре и нагружении только внутренним давлением p допустимо считать безмоментной [14], а ее полимерный материал изотропным. Поскольку температурное состояние оболочки осесимметрично относительно прямой $O'O$ (рис. 1), она будет симметричной относительно оси, совпадающей с этой прямой, т. е. безмоментной оболочкой вращения относительно этой оси. Для такой оболочки уравнение равновесия в проекции на нормаль к ее средней поверхности (уравнение Лапласа) имеет вид

$$N_1 / R_1 + N_2 / R_2 = p \quad (5)$$

где N_1 и N_2 – погонные усилия соответственно в меридиональном и окружном направлениях; а R_1 и R_2 – радиусы кривизны средней поверхности оболочки в этих направлениях. Для полных деформаций безмоментной оболочки вращения в этих направлениях справедливы соотношения [14]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= (du / d\theta + w) / R_1, \\ \varepsilon_2 (w + u \operatorname{ctg} \theta) / R_2 &= u_r / r, \end{aligned} \quad (6)$$

где u и w – перемещения точки средней поверхности в меридиональном направлении и в направлении нормали к этой поверхности; θ – угол между осью оболочки и этой нормалью; $u_r = u \cdot \cos \theta + w \cdot \sin \theta$ – перемещение перпендикулярно оси оболочки; r – радиус контура поперечного сечения средней поверхности плоскостью, перпендикулярной оси оболочки.

В предположении упругой работы материала оболочки, согласно обобщенному закону Гука, для полных деформаций в меридиональном и окружном направлениях запишем

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= (N_1 - \nu N_2) / (Eh + \alpha \Delta T(\psi)), \\ \varepsilon_2 &= (N_2 - \nu N_1) / (Eh + \alpha \Delta T(\psi)), \end{aligned} \quad (7)$$

где ν , E и α – соответственно коэффициент Пуассона, модуль Юнга и температурный коэффициент линейного расширения материала оболочки; $\Delta T(\psi) = T(\psi) - T_0$ – приращение температуры оболочки по сравнению с однородной по ее поверхности температурой T_0 , при которой оболочка имела сферическую форму с радиусом r_0 средней

поверхности. При нагружении оболочки вращения только внутренним избыточным давлением p в ее поперечном сечении радиусом r суммарная сила в направлении оси будет равна $P = 2\pi r N_1 \sin \theta = \pi r^2 p$. Отсюда, с учетом равенства $r = R_2 \sin \theta$ и уравнения (5), следует $N_1 = pr / (2 \cdot \sin \theta) = pR_2 / 2$ и $N_2 = (pR_2/2)(2 - R_2/R_1)$. Для сферической оболочки в этом случае $R_1 = R_2$ и $N_1 = N_2 = pR_1/2$. Если при осесимметричном распределении температуры по поверхности оболочки ККА в первом приближении принять $R_1 \approx R_2 \approx r_0$, то получим $N_2 \approx pR_2 / 2 = N_1$, что, согласно соотношениям (7), приводит к приближенному равенству $\varepsilon_1 \approx \varepsilon_2$. Тогда из формул (6) следует $du/d\theta \approx u \cdot \operatorname{ctg} \theta$, т. е. $u \approx C \cdot \sin \theta$, где $C = \text{const}$. В итоге принятого приближения из первых равенств (6) и (7) находим

$$w \approx pr_0^2 (1 - \nu) / (2Eh) + \alpha r_0 \Delta T(\psi) - C \cos \theta$$

Перемещение точек средней поверхности оболочки в направлении ее оси равно [14] $u_1 = u \cdot \sin \theta - w \cdot \cos \theta$, что с учетом формул для перемещений u и w дает

$$u_1 \approx C - (pr_0(1 - \nu) / (2Eh) + \alpha \Delta T(\psi)) r_0 \cos \theta$$

Если за нуль отсчета перемещения u_1 принять ближайшую к Земле точку при $\psi = \theta = 0$ (рис. 1), то получим

$$C = p(r_0 + w_0)^2 (1 - \nu) / (2Eh) + \alpha (r_0 + w_0) \Delta T(\psi)$$

и

$$u_1 \approx (p(r_0 + w_0)(1 - \nu) / (2Eh) + \alpha \Delta T(\psi)) \cdot (r_0 + w_0)(1 - \cos \theta) \quad (8)$$

Из вторых равенств (6) и (7) следует

$$u_r \approx (pr_0(1 - \nu) / (2Eh) + \alpha \Delta T(\psi)) r_0 \sin \theta \quad (9)$$

Из формул (8) и (9) видно, что изменение давления в рамках принятого приближения не искажает форму сферической оболочки, а лишь приводит к одинаковому во всех точках средней поверхности некоторому приращению ее первоначального радиуса r_0 . Отклонение формы оболочки от сферической непосредственно связано с неравномерностью распределения температуры по ее поверхности, причем эта неравномерность возникает, согласно формуле (4), только на облучаемой Землей части этой поверхности. Из соотношений (8) и (9) следует, что перемещения, вызванные лишь неравномерностью распределения температуры, при отождествлении в первом приближении угла θ с углом ψ можно оценить по формулам

$$\begin{aligned} u_r^* &= \alpha \Delta T(\psi) r_0 \sin \psi, \\ u_1^* &= \alpha \Delta T(\psi) r_0 (1 - \cos \psi) \end{aligned} \quad (10)$$

Результаты расчетов

Степень влияния излучения Земли на температурное состояние оболочки ККА зависит от значения параметра η . Для сравнения проведем вычисления при четырех значениях этого параметра, равных 0,03; 0,05; 0,1 и 0,2, что соответствует значениям высоты H над ее поверхностью Земли, равным 191,3; 318,6; 637,1 и 1274,3 км.

Пусть оболочка ККА изготовлена из упомянутой выше полиимидной пленки ПМФ-352 с напылением алюминия на внешней поверхности. Коэффициент поглощения A внутренней поверхности такой оболочки будет не менее 0,5 [25]. Увеличение значения A приводит к выравниванию распределения температуры по поверхности оболочки и уменьшению наибольшего значения $T(0)$ температуры при $\psi = 0$ в точке, ближайшей к поверхности Земли. Для сравнения при проведении расчетов примем два крайних значения $A = 0,5$ и $A = 1$ (второе значение для полости оболочки соответствует модели абсолютно черного тела [21]).

Для коэффициента поглощения слоя напыленного алюминия в его исходном состоянии после напыления можно использовать линейную зависимость $A(T) = 0,025 - 0,00007 \cdot (300 - T)$ от температуры T [26], установленную в промежутке от 100 К до 300 К для охлажденного расплава алюминия с неокисленной поверхностью. Однако при контакте слоя алюминиевого покрытия с атмосферным воздухом происходит окисление поверхности этого слоя и увеличение этого коэффициента. Кроме того, в процессе пребывания в космосе поверхность оболочки подвержена микрометеоритному воздействию, что приводит к возникновению шероховатости поверхности покрытия и возрастанию его коэффициента излучения. В силу отсутствия определенности величины коэффициента A' расчеты проведены для трех его дискретных значений, равных 0,015; 0,05 и 0,15.

Результаты расчетов распределения температуры по поверхности сферической оболочки ККА в зависимости от отношения $\bar{\psi} = \psi / \psi_m$ для указанных значений параметра η приведены на рис. 4–7. На всех этих рисунках сплошные кривые построены при значении $A = 0,5$, а штрихпунктирные – при значении $A = 1$. Кривые 1, 2 и 3 отвечают значениям соответственно 0,015; 0,05 и 0,15.

При фиксированном сочетании коэффициентов поглощения A и A' наибольшая температура сферической оболочки, соответствующая значению $\bar{\psi} = 0$, и температура изотермического участка, отвечающая значению $\bar{\psi} = 1$, убывают по мере возрастания параметра η . Это вызвано увеличением высоты ККА над поверхностью Земли

и связано с уменьшением потока излучения, падающего на поверхность оболочки. Но даже при $\eta = 0,2$ общий уровень температур (рис. 7) остается допустимым для такого полимерного материала, как пленка ПМФ-352 [27; 28]. Из представленных результатов видно, что при фиксированных значениях параметра η и коэффициента A неравномерность распределения температуры увеличивается с увеличением коэффициента A' , а при неизменных значениях η и A' переход от $A = 0,5$ к $A = 1$, как и следовало ожидать, в связи с выравниванием распределения температуры по поверхности оболочки температура изотермического участка оболочки возрастает.

Найденные распределения температуры по поверхности оболочки ККА могут быть использованы для оценки по формулам (10) отклонения формы этой оболочки от исходной сферической.

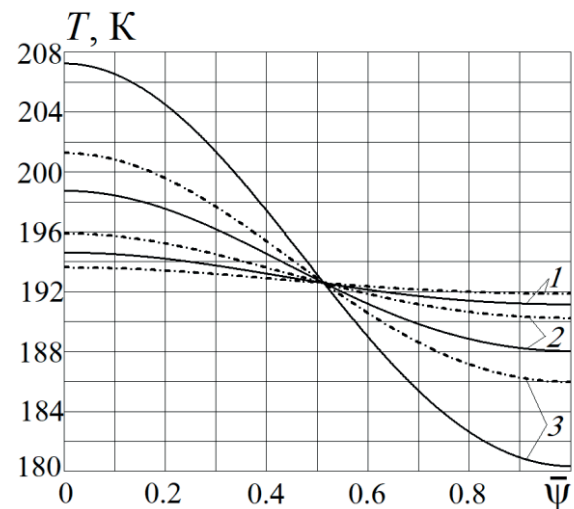


Рис. 4. Графики зависимости $T(\bar{\psi})$ от $\bar{\psi}$ при значении параметра $\eta = 0,03$

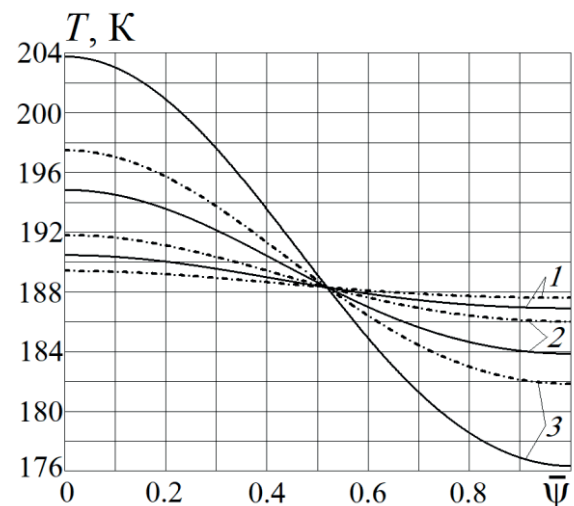


Рис. 5. Графики зависимости $T(\bar{\psi})$ от $\bar{\psi}$ при значении параметра $\eta = 0,05$

На рис. 8 и рис. 9 штрихпунктирной дугой полуокружности представлен контур продольного сечения средней поверхности оболочки при однородном распределении температуры T_0 , равной рассчитанному значению $T(\pi/2)$ (отсчет угла ψ происходит от положительного направления оси Ox_1).

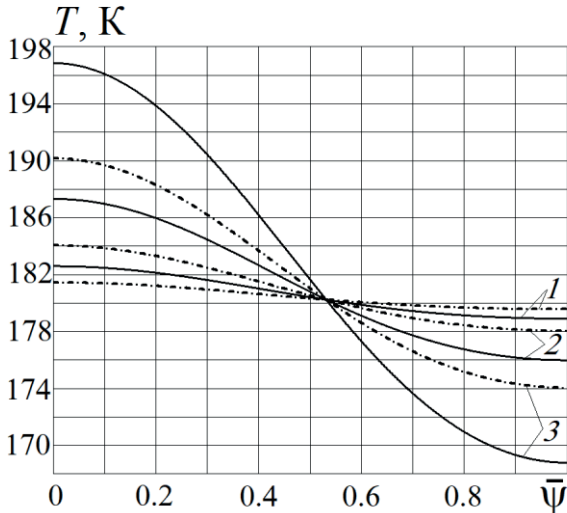


Рис. 6. Графики зависимости $T(\bar{\psi})$ от $\bar{\psi}$ при значении параметра $\eta = 0,1$

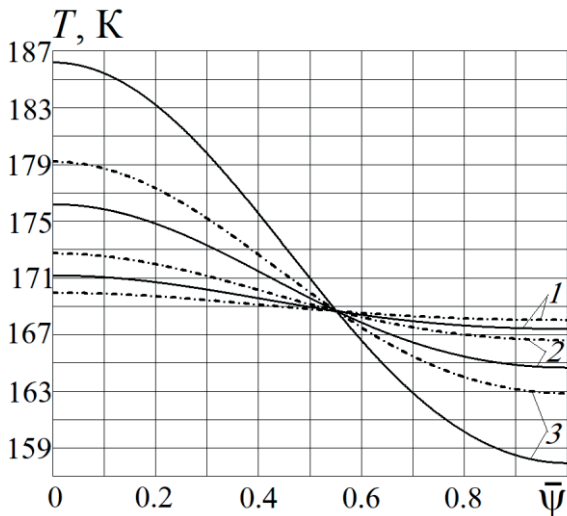


Рис. 7. Графики зависимости $T(\bar{\psi})$ от $\bar{\psi}$ при значении параметра $\eta = 0,2$

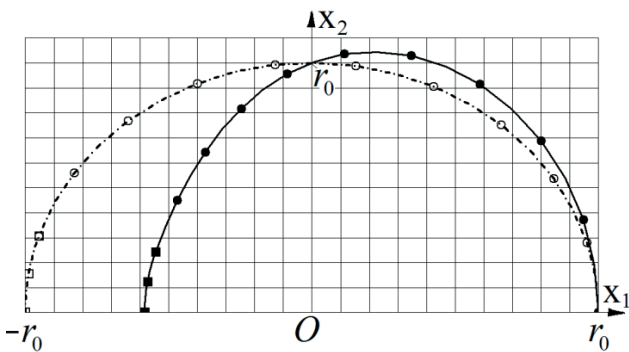


Рис. 8. Отклонение формы контура средней поверхности оболочки при $\eta = 0,05$

Светлыми кружками на этой полуокружности отмечена часть контура, на которую падает излучение Земли, а светлыми квадратами – его часть с постоянной температурой. Смещение темных кружков и квадратов на сплошной кривой по отношению к светлым позволяет сравнить степень локального искажения исходного контура средней поверхности при рассчитанном неоднородном распределении температуры $T(\psi)$. На участке контура с темными квадратами температура постоянна. Поэтому эта часть оболочки сохраняет сферическую форму, но с меньшим по сравнению с r_0 радиусом r_* , определяемым отношением $(r_0 - r_*)/r_0 = \alpha(T(\pi/2) - T(\pi))$. Для наглядности относительное изменение этого радиуса и смещение темных кружков по отношению к светлым увеличено на рис. 8 в $0,02 \cdot K^{-1}/\alpha$ раз, а на рис. 9 – в $0,05 \cdot K^{-1}/\alpha$ раз.

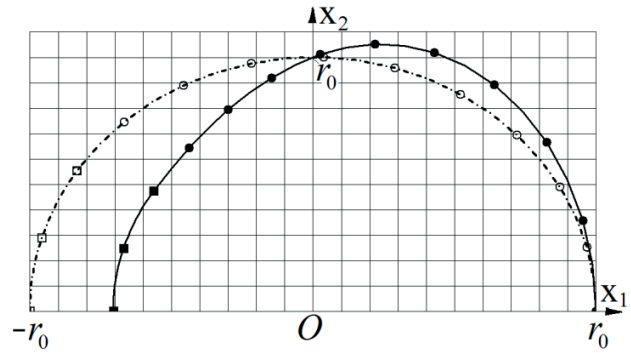


Рис. 9. Отклонение формы контура средней поверхности оболочки при $\eta = 0,2$

Из сравнения штрихпунктирной полуокружности со сплошной кривой видно, что в окрестности наиболее близкой к Земле точки оболочки ее радиусы кривизны увеличиваются по сравнению с исходным значением, равным r_0 . Затем по мере возрастания угла ψ при продолжающемся росте значения R_2 радиус кривизны R_1 начинает убывать. При $\psi > \pi/2$ после достижения радиусом R_2 максимальной величины его значение начинает убывать и сближаться с возрастающим значением R_1 до их совпадения при $\psi \approx 2,83 \approx 162^\circ$ на рис. 8 и при $\psi \approx 2,56 \approx 146^\circ$ на рис. 9.

Заключение

Тепловая часть представленной комплексной математической модели, описывающая установившееся температурное состояние алюминированной полимерной сферической оболочки ККА, находящегося на затененном участке околоземной орбиты, позволяет установить зависимость распределения температуры по поверхности этой оболочки от высоты космического аппарата над поверхностью Земли и от коэффициентов излучения внешней и внутренней по-

верхностей оболочки. Эта зависимость использована для оценки отклонения формы оболочки от сферической, вызванного неравномерностью распределения температуры. Полученные ре-

зультаты могут быть полезны для прогноза работоспособности ККА на затененном участке околоземной орбиты.

Список литературы

1. Малые космические аппараты информационного обеспечения / Под ред. В. Ф. Фатеева. М. : Радиотехника, 2010. 320 с.
2. Ракеты и космические аппараты конструкторского бюро «Южное» / А. Н. Машенко, В. Н. Паппо-Корыстин, В. А. Пашенко, В. Г. Васильев; под общей редакцией Генерального конструктора С. Н. Конюхова. Днепропетровск : ГKB «Южное» им. М.К. Янгеля, 2000. 240 с.
3. Тарасенко М. В. Военные аспекты советской космонавтики. М. : Агентство Российской печати, ТОО «Николь», 1992. 164 с.
4. Freeland R. E., Bilyeu G. D., Veal G. R. Development of flight hardware for a large, inflatable-deployable antenna experiment // *Acta Astronautica*, 1996, vol. 38, no. 4–8, pp. 251–260. doi: 10.1016/0094-5765(96)00030-6.
5. Chodimella S. P., Moore J., Otto J., Fang H. Design evaluation of a large aperture deployable antenna // *AIAA Papers*, 2006, no. 1603, pp. 1–20. doi: 10.2514/6.2006-1603.
6. Зимин В. Н., Крылов А. В., Мешковский В. Е., Сдобников А. Н., Файзуллин Ф. Р., Чурилин С. А. Особенности расчета раскрытия крупногабаритных трансформируемых конструкций различных конфигураций // *Наука и образование*. 2014. №10. С. 179–191. doi: 10.7463/1014.0728802.
7. Зарубин В. С., Зимин В. Н., Кувыркин Г. Н. Температурное состояние и отклонение формы сферической оболочки космического калибровочно-стировочного аппарата // *Аэрокосмический научный журнал*. 2016. № 1. С. 27–45. doi: 10.7463/aersp.0116.0831867.
8. Zarubin V. S., Zimin V. N., Kuvyrkin G. N. Temperature distribution in the spherical shell of a gauge-alignment spacecraft // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2017, vol. 58, no. 6, pp. 1083–1090. doi: 10.1134/S0021894417060141.
9. Зарубин В. С., Зимин В. Н., Кувыркин Г. Н. Температурное состояние оболочки калибровочного космического аппарата на теновом участке околоземной орбиты // *Аэрокосмический научный журнал*. 2016. № 4. С. 22–37. doi: 10.7463/aersp.0416.0846458.
10. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике / Под ред. В. К. Кошкина. М. : Машиностроение, 1975. 624 с.
11. Optical Calibration Sphere Experiment [Электронный ресурс]. URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/j/jawsat#footback10> (дата обращения 25.08.2018).
12. Зимин В. Н. К вопросу моделирования и расчета динамики раскрытия трансформируемых космических конструкций // *Оборонная техника*. 2006. № 1. С. 123–127.
13. Zarubin V. S., Kuvyrkin G. N. Mathematical Modeling of Thermomechanical Processes under Intense Thermal Effect // *High Temperature*, 2003, vol. 41, no. 2, pp. 257–265. doi: 10.1023/A:1023390021091.
14. Балабух Л. И., Колесников К. С., Зарубин В. С., Алфутов Н. А., Усюкин В. И., Чижов В. Ф. Основы строительной механики ракет. М. : Высшая школа, 1969. 496 с.
15. Марчук Г. И., Кондратьев К. Я., Козодеров В. В. Радиационный баланс Земли: ключевые аспекты. М. : Наука, 1988. 224 с.
16. Павлов А. В. Оптико-электронные приборы. М. : Энергия, 1974. 360 с.
17. Кондратьев К. Я., Дьяченко Л. Н., Козодеров В. В. Радиационный баланс Земли. Л. : Гидрометеиздат, 1988. 350 с.
18. Gilmor D. G. *Spacecraft thermal control handbook*. vol. 1. *Fundamental Technologies* / El Segundo, California, Aerospace Press, 2002. 836 p.
19. Комарова М. А. Температурные условия на корпусе узлового модуля на этапе автономного полета к международной космической станции // *Известия РАН. Энергетика*. 2012. № 2. С. 23–30.
20. Гукало А. А., Грибков А. С. Оптимизация температуры плоского и крестообразного холодильника–излучателя космической ядерной энергетической установки с учетом внешнего теплового излучения // *Известия РАН. Энергетика*. 2012. № 2. С. 103–110.
21. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением / Пер. с англ. М. : Мир, 1975. 934 с.
22. Бюллер К. У. Тепло- и термостойкие полимеры / Пер. с нем. М. : Химия, 1984. 1056 с.
23. Аналитический портал химической промышленности [Электронный ресурс]. URL: <http://www.newchemistry.ru/production.php?cat-id=52&catparent=7&level=3> (дата обращения 28.08.2018).

24. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники : справочник. М. : Атомиздат, 1968. 484 с.
25. Многослойные и комбинированные пленочные материалы и изделия из них: интернет-ресурс [Электронный ресурс]. URL: rccgroup.ru/plast/wp-content/uploads/3.9.-Ivanenko.ppt (дата обращения 28.08.2018).
26. Излучательные свойства твердых материалов : справочник / Под общ. ред. А. Е. Шейндлина. М. : Энергия, 1974. 472 с.
27. Обзор базовых свойств и сфер применения политетрафторэтилена (PTFE) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.engplast.ru/entry.php?198&id=2> (дата обращения 28.08.2018).
28. Комков М. А., Сабельников В. В., Баслык К. П. Конструктивно-технологический анализ трубопроводов, намотанных из полиимидофторопластовой пленки // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2012. С. 78–86.

TEMPERATURE STATE AND ESTIMATION OF DEVIATION IN THE SHAPE OF THE SPHERICAL SHELL OF THE CALIBRATION SPACECRAFT IN THE SHADOW SECTION OF THE NEAR-EARTH ORBIT

V. S. Zarubin, V. N. Zimin, G. N. Kuvyrkin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

A complex mathematical model describing alteration in a shape of a spherical shell of a calibration spacecraft is presented. The alteration is caused by the uneven temperature distribution over the shell surface when it is in the shadow section of the near-earth orbit. The thermal part of the model takes into account influence upon the shell of the own Earth radiation and the radiation heat transfer in the shell cavity. Unevenness of the shell surface radiation leads to the unevenness of the temperature distribution over the shell surface and thus to the alteration in shape of the spherical shell, that can affect the device functional characteristics. To determine the distortion in shape of the spherical shell, the fundamentals of the membrane theory of rotational shells were used. The quantitative analysis of the discussed model was carried out for cases of the steady non-uniform temperature distribution along the shell surface arising at different heights of the spacecraft above the Earth's surface. Obtained estimations of the distortion in shape of the shell of the calibration spacecraft can be compared with the permissible deviations that do not violate the spacecraft functional characteristics in the shadow section of the near-earth orbit.

Keywords: calibration spacecraft, spherical shell, Earth surface radiation, radiation heat transfer.

References

1. Fateev V. F. *Malye kosmicheskie apparaty informatsionnogo obespecheniya* [Small spacecrafts for information support]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2010, 320 p. (In Russian)
2. Mashchenko A. N., Pappo-Korystin V. N., Pashchenko V. A., Vasil'ev V. G. *Rakety i kosmicheskie apparaty konstruktorskogo byuro «Yuzhnoe»* [Rockets and spacecraft from the engineering department «Yuzhnoe»]. Dnepropetrovsk, The Yangel' state engineering department «Yuzhnoe» Publ., 2000, 240 p. (In Russian)
3. Tarasenko M. V. *Voennye aspekty sovetskoy kosmonavtiki* [Military aspects of the soviet astronautics]. Moscow, Russian press agency special partnership «Nikol'» Publ., 1992, 164 p. (In Russian)
4. Freeland R. E., Bilyeu G. D., Veal G. R. Development of flight hardware for a large, inflatable-deployable antenna experiment // *Acta Astronautica*, 1996, vol. 38, no. 4–8, pp. 251–260. doi: 10.1016/0094-5765(96)00030-6.
5. Chodimella S. P., Moore J., Otto J., Fang H. Design evaluation of a large aperture deployable antenna // *AIAA Papers*, 2006, no. 1603, pp.1–20. doi: 10.2514/6.2006-1603.
6. Zimin V. N., Krylov A. V., Meshkovskiy V. E., Sdobnikov A. N., Fayzullin F. R., Churilin S. A. *Osobennosti rascheta raskrytiya krupnogabaritnykh transformiruemykh konstrukcij razlichnykh konfiguracij* [Special features of deploy calculation for large transformable structures of different configuration] // *Nauka i obrazovanie, MGTU im. N. E. Bauman*, 2014, no. 10, pp. 179–191. doi: 10.7463/1014.0728802. (In Russian)
7. Zarubin V. S., Zimin V. N., Kuvyrkin G. N. *Temperaturnoe sostoyanie i otklonenie formy sfericheskoy obolochki kosmicheskogo kalibrovochnoyustirovochnogo apparata* [Temperature state and deviation in a shape of a spherical shell of a space calibrator] // *Aerokosmicheskii nauchny zhurnal*, 2016, no. 1, pp. 27–45. doi: 10.7463/aersp.0116.0831867. (In Russian)

8. Zarubin V. S., Zimin V. N., Kuvyrkin G. N. Temperature distribution in the spherical shell of a gauge-alignment spacecraft // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2017, vol. 58, no. 6, pp. 1083–1090. doi: 10.1134/S0021894417060141. (In Russian)
9. Zarubin V. S., Zimin V. N., Kuvyrkin G. N. *Temperaturnoe sostoyanie obolochki kalibrovochnogo kosmicheskogo apparata na tenevom uchastke okolozemnoj orbity* [Temperature state of a shell of a gauge spacecraft on the shadow section of the near-earth orbit]. *Aerokosmicheskii nauchny zhurnal*, 2016, no. 4, pp. 22–37. doi: 10.7463/aersp.0416.0846458. (In Russian)
10. Koshkin V. K. *Osnovy teploperedachi v aviatsionnoy i raketno-kosmicheskoy tekhnike* [Fundamentals of heat-transfer in aviation and space-rocket engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975, 624 p. (In Russian)
11. Optical Calibration Sphere Experiment. Available at: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/j/jawsat#footback10> (accessed 25.08.2018).
12. Zimin V. N. *K voprosu modelirovaniya i rascheta dinamiki raskrytiya transformiruemykh kosmicheskikh konstrukcij* [On modeling and calculation of deployment dynamics of transformable space structures] // *Oboronnaya tekhnica*, 2006, no. 1, pp. 123–127. (In Russian)
13. Zarubin V. S., Kuvyrkin G. N. Mathematical Modeling of Thermomechanical Processes under Intense Thermal Effect // *High Temperature*, 2003, vol. 41, no. 2, pp. 257–265. doi: 10.1023/A:1023390021091.
14. Balabukh L. I., Kolesnikov K. S., Zarubin V. S., Alfutov N. A., Usyukin V. B., Chizhov V. F. *Osnovy stroitel'noy mekhaniki raket* [Fundamentals of the rocket structural mechanics]. Moscow, Visshaya shkola Publ., 1969, 496 p. (In Russian)
15. Marchuk G. I., Kondrat'ev K. Ya., Kozoderov V. V. *Radiatsionny balans Zemli: klyuchevye aspekty* [Earth-radiation budget: main aspects]. Moscow, Nauka Publ., 1988, 224 p. (In Russian)
16. Pavlov A. B. *Optiko-elertronnye pribory* [Optoelectronic devices]. Moscow, Energiya Publ., 1974, 380 p. (In Russian)
17. Kondrat'ev K. Ya., D'yachenko L. N., Kozoderov V. V. *Radiatsionny balans Zemli* [Earth-radiation budget]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1988, 350 p. (In Russian)
18. Gilmor D. G. *Spacecraft thermal control handbook*. vol. 1. Fundamental Technologies / El Segundo, California, Aerospace Press, 2002. 836 p.
19. Komarova M. A. *Temperaturnye usloviya na korpuse uzlovogo modulya na ehtape avtonomnogo poleta k mezhdunarodnoj kosmicheskoy stancii* [Temperature conditions at the main module airframe on the stage of autonomy flight to the international space station] // *Izvestiya RAN. Energetika*, 2012, no. 2, pp. 23–30. (In Russian)
20. Gukalo A. A., Gribkov A. S. *Optimizaciya temperatury ploskogo i krestoobraznogo holodil'nika–izluchatelya kosmicheskoy yadernoy ehnergeticheskoy ustanovki s uchetom vneshnego teplovogo izlucheniya* [Temperature optimization for a flat cross-formed cooler-emitter of a space nuclear power system that takes into account the outer heat radiation] // *Izvestiya RAN. Energetika*, 2012, no. 2, pp. 103–110. (In Russian)
21. Zigel' R., Khauell G. *Teploobmen izlucheniem* [Radiative heat exchange]. Moscow, Mir Publ., 1975, 934 p. (In Russian)
22. Byuller K. U. *Teplo- i termostoykie polimery* [Heat-resistant polymers]. Moscow, Khimiya Publ., 1984, 1056 p. (In Russian)
23. *Analiticheskii portal khimicheskoy promyshlennosti* [Analytical portal of the chemical industry]. Available at: <http://www.newchemistry.ru/production.php?cat-id=52&catparent=7&level=3> (accessed 28.08.2018). (In Russian)
24. Chirkin V. S. *Teplofizicheskie svoystva materialov yadernoy tekhniki. Spravochnik* [Heat-transfer properties of the nuclear engineering materials. Reference book]. Moscow, Atomizdat Publ., 1968, 484 p. (In Russian)
25. *Mnogosloynnye i kombinirovannye plenochnye materialy i izdeliya iz nikh* [Multilayer and combined film materials and product made from them]. Available at: <http://rccgroup.ru/plast/wp-content/uploads/3.9.-Ivanenko.ppt> (accessed 28.08.2018). (In Russian)
26. Sheydlin A. E. *Izluchatel'nye svoystva tverdykh materialov* [Emitting properties of the hard materials]. Moscow, Energiya Publ., 1974, 472 p. (In Russian)
27. *Obzor bazovykh svoystv i sfer primeneniya politetraftoretilena (PTFE)* [Review of fundamental properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE)]. Available at: <http://www.engplast.ru/entry.php?198&id=2> (accessed 28.08.2018). (In Russian)
28. Komkov M. A., Sabel'nikov V. V., Baslyk K. P. *Konstruktivno-tekhnologicheskij analiz truboprovodov, namotannykh iz poliimidofloroplastovoy plenki* [Constructively-technological analysis of pipe conduits wound with polyimido-fluoroplastic film] // *Vestnik MGTU im. N. E. Baumana, Mashinostroenie*, 2012, pp. 78–86. (In Russian).