

ВЛИЯНИЕ ШИРОТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И АЛЬБЕДО ЗЕМЛИ НА ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА НА СОЛНЕЧНО-СИНХРОННОЙ ОРБИТЕ

© 2014 г. Ю. В. Баёва, аспирант; Е. В. Лаповок, канд. техн. наук;
С. И. Ханков, доктор техн. наук

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: yul.bayo@yandex.ru

Получено аналитическое описание влияния на колебания температуры космического объекта сферической формы, движущегося по солнечно-синхронной орбите, неравномерности теплового излучения Земли и отраженного ею солнечного излучения. Исследовано влияние на амплитуду периодических отклонений от стационарного теплового состояния определяющих параметров. Установлены граничные значения термической инерции космического объекта, зависящей от толщины стенки полый сферы, а также высоты его орбиты, начиная с которых тепловая неоднородность Земли не оказывает значимого влияния на его тепловой режим.

Ключевые слова: космический объект, коэффициент облученности, тепловой режим, теплообмен излучением, излучение Земли, альbedo Земли.

Коды OCIS: 120.4640, 120.0280, 350.1246, 350.6050, 350.6090

Поступила в редакцию 20.12.2012

Введение

В общепринятых методах расчетов тепловых режимов космических объектов (КО) обычно принимается модель Земли как изотермической сферы с серой диффузной поверхностью [1–5]. В действительности температура Земли существенно изменяется, особенно в широтном направлении от экватора к полюсам, а альbedo Земли существенно увеличивается в полярных областях за счет высокой отражательной способности ледовых и снежных покровов. Вопрос о необходимости учета этих факторов до сих пор оставался открытым.

Целью данной работы является определение необходимости учета этих факторов при расчете тепловых режимов КО, главным образом космических аппаратов (КА), движущихся по круговым траекториям, при наиболее сильном их влиянии, наблюдающемся на полярной солнечно-синхронной орбите.

В задачи исследования входили разработка математической модели КО, движущегося по полярной солнечно-синхронной траектории, с учетом всех факторов тепловых воздействий, включая фактор зависимости мощности соб-

ственного теплового излучения Земли и ее альbedo от географической широты, исследование влияния поверхностной плотности теплоемкости КО, определяемой толщиной стенки полый сферы, на степень отклонения его температуры от равновесного теплового состояния, соответствующего условию постоянной мощности тепловой подсветки Земли, а также определение условий, при которых Землю в расчетах можно принимать как модель изотермического шара с однородной отражательной способностью в спектре солнечного излучения по всей поверхности.

Важно подчеркнуть, что учет реальных распределений температур и альbedo по поверхности Земли не входит в поставленную задачу, поскольку эти факторы подвержены периодическим годовым и многолетним изменениям. Для оценки влияния таких факторов достаточно изучить модельную задачу с монотонным изменением указанных параметров по широтной угловой координате, описываемых периодическими функциями – синусами и косинусами от угловых координат. Решение такой модельной задачи даст наглядное представление о принципиальной значимости этих факторов. Вместе

с тем, используемая математическая модель обеспечивает общность получаемых результатов и может быть применена в любых законах изменения, если в этом возникнет необходимость.

Физическая модель

Физическая модель процесса движения КО по круговой орбите в общих чертах достаточно изучена. Объектом исследования в данной работе является влияние переменных во времени тепловых воздействий на КО, обусловленных изменением в течение каждой четверти периода потока собственного теплового излучения от Земли и отраженного Землей солнечного излучения. Указанные потоки определяются коэффициентами облученности φ_s (коэффициент облученности собственным тепловым излучением Земли) и φ_{ks} (комбинированный коэффициент облученности отраженным Землей солнечным излучением).

В соответствии с принципом поэтапного моделирования [6] первым необходимым этапом исследований тепловых режимов тел и систем тел является определение среднеобъемных температур. На последующем этапе определяются распределения температур в исследуемых телах. В рассматриваемом случае достаточно ограничиться первым этапом, поскольку целью исследования является установление границ термоинерционных свойств КО по интенсивности отклика температурных колебаний на переменные составляющие тепловых воздействий. Поэтому примем модель изотермического КО, т.е. будем считать теплопроводность материала КО бесконечно большой.

В качестве объекта исследований принимается изотермический КО сферической формы с однородными радиационными свойствами поверхности. Такой выбор объекта обусловлен следующими обстоятельствами. Сферический КО имеет постоянное во всех направлениях отношение площади миделя F к полной поверхности S , поэтому отпадает необходимость учета ориентации какой-либо из осей в любой из систем координат, что при любой другой форме могло бы приводить к нестационарности теплового режима в случае изменения положения оси. Сферический КО может служить эталонной моделью, относительно которой могут вычисляться и учитываться все возможные отклонения КО с преимущественной протяжен-

ностью вдоль какой-либо из осей (например, цилиндр, параллелепипед).

Постоянная термической инерции КО зависит от отношения его объема к площади поверхности, и в конечном счете – от отношения определяющего размера к объемной теплоемкости. В результате в качестве параметров, определяющих термоинерционность объекта, следует использовать поверхностную плотность полной теплоемкости и определяющий размер, которым для полой сферы является толщина стенки [2]. При расчетах поверхностных плотностей теплоемкостей КО будем иметь в виду оболочечную структуру сферического КО с постоянной толщиной стенки Δ , а расчеты проводить в зависимости от значения Δ , высоты орбиты h и для двух значений коэффициента поглощения солнечного излучения α_s .

Полярная орбита выбирается по двум соображениям. Во-первых, она в наибольшей степени соответствует модели неравномерной во времени подсветки, а для оценки максимального влияния этой неравномерности примем те условия, которые соответствуют дням осеннего и весеннего равноденствия, считая, что в другие периоды, с учетом реальной ориентации оси Земли, указанные неравномерности будут меньше. Во-вторых, выбирая среди полярных орбит солнечно-синхронную орбиту, плоскость которой всегда перпендикулярна направлению на Солнце, приходим к модели, которая соответствовала бы стационарному тепловому режиму КО при однородной модели Земли, что дает возможность в наиболее наглядном виде оценить влияние на отклонение от теплового равновесия КО именно неоднородности тепловой и отраженной подсветки Земли.

Модель Земли как объекта подсветки целесообразно описать в самом упрощенном виде временными зависимостями потоков собственного теплового и отраженного солнечного излучений в виде следующих функций:

– переменный поток собственного теплового излучения Земли

$$\Delta Q_e(\tau) = \Delta Q_e \cos(4\pi\tau/t_0), \quad (1)$$

– отраженное Землей солнечное излучения

$$\Delta Q_s(\tau) = E\Delta A |\sin(2\pi\tau/t_0)|, \quad (2)$$

где ΔQ_e – амплитуда изменения мощности теплового излучения Земли от экватора к полюсу, ΔA – амплитуда изменения альбедо Земли

от экватора к полюсу, $E = 1366 \text{ Вт/м}^2$ – солнечная постоянная, τ – текущее время движения КО по орбите, t_0 – период обращения КО вокруг Земли, зависящий от высоты орбиты.

Функция (1) выбрана из следующих соображений: максимальный поток наблюдается при отсчете от экватора ($\tau = 0$), минимальный – при $\tau = t_0/4$; при $\tau = t_0/8$ (середины между указанными точками) значение удельной мощности, излучаемой Землей, соответствует среднему значению, обычно используемому в расчетах [1–5].

Вид функции (2) выбран с учетом совсем других соображений: в экваториальной области максимальное значение альbedo не достигается, а имеет место то его значение, которое определяет средний энергетический баланс Земли, называемое альbedo Бонда [1–5]. Оно является средним значением по всей поверхности Земли, подсвечиваемой Солнцем, а при долговременном процессе установления состояния Земли вблизи теплового равновесия альbedo Бонда является усредненным за многолетний период параметром. Функция (2) отражает факт значительного увеличения альbedo по мере роста угловой координаты от экватора к полюсу. При $\tau = t_0/4$ приращение отраженного потока достигает максимального значения.

Приращение потока собственного теплового излучения Земли оказывает быстрое и непосредственное влияние на подсветку КО. Приращение альbedo в полярных областях существенно компенсируется малым значением комбинированного коэффициента облученности. В связи с этим необходимо исследование влияния этих факторов как совместно, так и по отдельности.

Необходимо подчеркнуть, что неравномерность излучения Земли проявляется через поглощаемый КО тепловой поток в усредненном по углу $2\theta_0$, под которым с КО видна Земля, виде. Если отказаться от интегрирования по широтной координате в пределах угла $2\theta_0$, будет получен результат по амплитуде колебания температуры, наиболее резко отслеживающий фактор неравномерности. Будем считать достаточным получение именно этого результата, наиболее резко выявляющего амплитуду колебаний температуры КО. В этом случае критерии малости влияния изучаемого фактора при определенном сочетании параметров будут гарантированно достаточными, что позволит твердо определить рамки применимости модели изотермической и оптически однородной Земли.

Период обращения КО вокруг Земли зависит от высоты орбиты и описывается известным соотношением [7], которое для дальнейших расчетов удобно выразить через локальный коэффициент облученности плоской площадки, расположенной в плоскости местного горизонта, Φ_0 в виде

$$t_0 = 2\pi \frac{(R+h)^{3/2}}{R g^{1/2}} = 84,1 \Phi_0^{-3/4} \text{ мин}, \quad (3)$$

$$\Phi_0 = \left(\frac{R}{h+R} \right)^2,$$

где $R = 6371 \text{ км}$ – радиус Земли, h – высота орбиты над поверхностью Земли, g – ускорение свободного падения на уровне $h = 0$.

Необходимо отметить, что мощность теплового излучения Земли Q_e может быть выражена через эффективную температуру Земли $T_e = 254 \text{ К}$ [4]. С учетом вариаций температур ΔT она описывается соотношением

$$Q_e = \sigma (T_e \pm \Delta T)^4 = \sigma T_e^4 \pm 4\sigma T_e^3 \Delta T, \quad (4)$$

где σ – постоянная Стефана–Больцмана.

Последнее слагаемое в соотношении (4) образуется в результате линеаризации общего вида выражения, которая справедлива в рамках ограниченных изменений ΔT . Соответственно приращение мощности теплового излучения Земли ΔQ_e в линеаризованном приближении может быть представлено в виде

$$\Delta Q_e = 4\sigma T_e^3 \Delta T = 3,72 \Delta T \text{ Вт/м}^2. \quad (5)$$

В результате исследований установлено, что погрешность линеаризации не превышает 2% при $\Delta Q_e \leq 50 \text{ Вт/м}^2$ и $\Delta T \leq 14 \text{ К}$ (такому значению ΔT соответствует $\Delta Q_e = 50 \text{ Вт/м}^2$). В дальнейших расчетах ограничимся указанными значениями приращений. За неимением достоверных фактических данных такие значения приращений достаточны для решения рассматриваемой модельной задачи.

Математическая модель

Нестационарное уравнение энергетического баланса КО, описывающее его нелинейный теплообмен излучением в околоземном космическом пространстве, имеет вид

$$C_s \frac{dT}{d\tau} + \varepsilon(1 - \varphi_s) \sigma T^4 = Q_\Sigma, \quad (6)$$

$$C_s = \frac{c_0 V}{S} = c_0 L, \quad c_0 = c\gamma,$$

где C_s – поверхностная плотность теплоемкости сферического КО в Дж/м² К, T – температура КО, τ – текущее время, ε – степень черноты поверхности КО, φ_s – коэффициент облученности сферического КО собственным тепловым излучением Земли, Q_Σ – удельная мощность, полученная КО от внешних источников (поток излучения Солнца и Земли и отраженный Землей солнечный поток), c_0 , c , γ – соответственно, объемная теплоемкость, удельная теплоемкость и плотность материала КО, V – объем КО, S – площадь поверхности КО, L – определяющий размер (для сферической оболочки $L = \Delta$).

Удельная мощность поглощаемых КО тепловых потоков складывается из среднего постоянного значения $Q_{\Sigma 0}$ и переменной составляющей ΔQ_Σ : $Q_\Sigma = Q_{\Sigma 0} + \Delta Q_\Sigma$.

Суммарная средняя удельная мощность всех поглощаемых поверхностью КО энергий источников внешней подсветки определяется по формуле

$$Q_{\Sigma 0} = \varepsilon \varphi_s Q_e + \alpha_s A E \varphi_{ks} + \alpha_s E \Phi, \quad (7)$$

где $Q_e = 239$ Вт/м² – удельная мощность собственного теплового излучения Земли, α_s – коэффициент поглощения солнечного излучения поверхностью КО, A – альbedo Бонда Земли, φ_{ks} – комбинированный коэффициент облученности сферического КО отраженным Землей солнечным излучением, Φ – отношение площади миделя КО к общей площади его поверхности, для сферического КО получается $\Phi = 0,25$.

Переменная во времени составляющая поглощаемого поверхностью КО внешнего теплового потока равна

$$\Delta Q_\Sigma = Q_\Sigma - Q_{\Sigma 0} = a \left[\cos \left(4\pi \frac{\tau}{t_0} \right) + b \left| \sin \left(2\pi \frac{\tau}{t_0} \right) \right| \right], \quad (8)$$

где

$$a = \varepsilon \Delta Q_e \varphi_s, \quad b = n_s E \frac{\Delta A}{\Delta Q_e} \frac{\varphi_{ks}}{\varphi_s}, \quad n_s = \frac{\alpha_s}{\varepsilon}.$$

Для изотермической модели Земли с постоянным альbedo при движении КО по солнечно-синхронной орбите $Q_{\Sigma 0} = \text{const}$, вследствие чего из соотношения (6) следует, что со временем КО, движущийся по солнечно-постоянной орбите, входит в состояние теплового равновесия.

Стационарное значение температуры КО определяется по формуле, вытекающей из уравнения (6) при $dT/d\tau = 0$

$$T_s = 4 \sqrt[4]{\frac{Q_\Sigma}{\varepsilon(1-\varphi_s)\sigma}}. \quad (9)$$

Периодически изменяющееся приращение температуры может быть описано приближенным соотношением, которое выполняется тем точнее, чем меньше полная теплоемкость КО

$$\begin{aligned} \Delta T = T - T_c &= 4 \sqrt[4]{\frac{Q_{\Sigma 0} + \Delta Q_\Sigma}{(1-\varphi_s)\sigma}} - 4 \sqrt[4]{\frac{Q_{\Sigma 0}}{(1-\varphi_s)\sigma}} = \\ &= T_c \left(4 \sqrt[4]{1 + \frac{\Delta Q_\Sigma}{Q_{\Sigma 0}}} - 1 \right). \end{aligned} \quad (10)$$

Исходные данные для расчета

В расчетах принимались следующие постоянные значения параметров:

$c = 922$ Дж/кг К, $\gamma = 2640$ кг/м³ – для АМГ6, $c_0 = 2,434 \times 10^6$ Дж/м³ К, $T_0 = 290$ К, $A = 0,3$, $\Delta = 0, 10^{-6}, 10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}$ м, $\varepsilon = 1$, $\alpha_s = 0,25$ и 1 , $\Delta Q_e = 50$ Вт/м², что соответствует $\Delta T = 14$ К, $\Delta A = 0,6$.

Значения периодов обращения $t_0(h)$ вычислялись по формуле (3). Значения ΔQ_e и ΔA выбраны по следующим соображениям. До $\Delta Q_e \leq 50$ Вт/м² с малой погрешностью приращение потока, пропорциональное приращению температуры, описывается в линейном приближении и по своему значению достаточно велико для проведения оценок возможных амплитуд колебаний температуры КО по максимуму. Значение $\Delta A = 0,6$ соответствует полному альbedo Земли в полярных областях $A = 0,9$, что примерно соответствует значению альbedo ледового и снежного покрова.

Результаты расчетных исследований

В табл. 1 представлены зависимости орбиты расчетных значений периодов обращения вокруг Земли t_0 от высоты, а также коэффициентов облученности φ_s и φ_{ks} для солнечно-постоянной орбиты, вычисленных по известным методикам [1, 2]. Там же приведены значения стационарных температур для этих орбит, рассчитанных по формуле (9) при $\Delta Q_\Sigma = 0$, при двух значениях коэффициентов поглощения α_s .

На рис. 1, 2 представлены результаты расчетов временных зависимостей температур КО с различными значениями толщины стенки от 1 мкм (что практически соответствует безынерционному объекту) до 10 мм при высоте орбиты 600 км и $\alpha_s = 0,25$. Расчеты проводились на основе решения дифференциального уравне-

Таблица 1. Зависимость периода обращения t_0 , коэффициентов облученности сферического КО φ_s и φ_{ks} , а также его стационарной температуры T_0 от высоты орбиты h

h , км	t_0 , мин	φ_s	φ_{ks}	T_0 , К	
				$\alpha_s = 0,25$	$\alpha_s = 1$
400	92,1	0,331	0,0093	256,9	325,2
600	96,3	0,297	0,011	250,7	319,8
1000	104,6	0,249	0,013	242,0	312,5
1500	115,5	0,206	0,014	234,5	306,4
2000	126,7	0,176	0,014	229,1	302,1
5000	200,5	0,086	0,0107	231,1	290,0

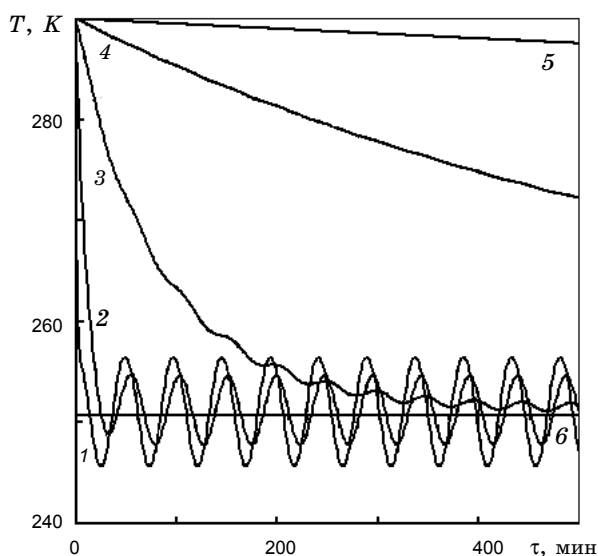


Рис. 1. Зависимость температуры КО с объемной теплоемкостью его материала $2,43 \times 10^6$ Дж/м³ К от времени при движении по солнечно-постоянной круговой орбите высотой 600 км ($t_0 = 96$ мин) при $T_0 = 290$ К и $\alpha_s = 0,25$. Кривая 1 соответствует характерному размеру 1 мкм, 2 – 10 мкм, 3 – 100 мкм, 4 – 1 мм, 5 – 10 мм. Прямая линия 6 соответствует стационарной температуре.

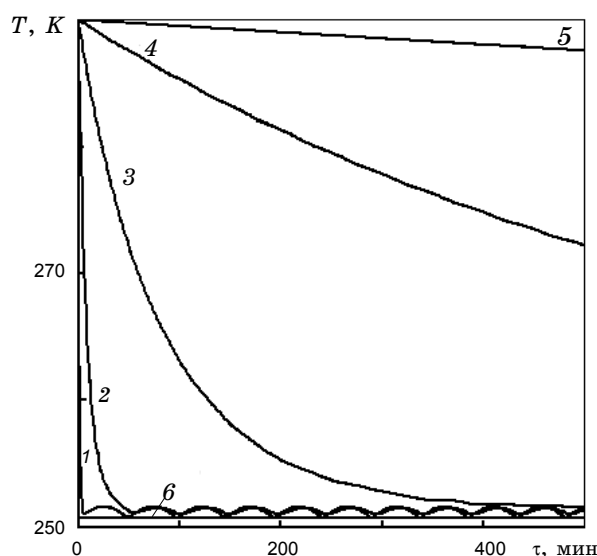


Рис. 2. Зависимость температуры КО с объемной теплоемкостью его материала $2,43 \times 10^6$ Дж/м³ К от времени при движении по солнечно-постоянной круговой орбите высотой 600 км ($t_0 = 96$ мин) при $T_0 = 290$ К и $\alpha_s = 0,25$. В расчетах учитывалось только изменение альbedo Земли, а мощность ее излучения принималась постоянной. Кривая 1 соответствует характерному размеру 1 мкм, 2 – 10 мкм, 3 – 100 мкм, 4 – 1 мм, 5 – 10 мм. Прямая линия 6 соответствует стационарной температуре.

ния (6). Из этих рисунков можно сделать следующие выводы:

- малоинерционный (а практически безынерционный КО) с толщиной стенки 1 мкм практически с первого же периода входит в режим периодически повторяющихся температур (квазиравновесный режим), при этом у него достигается максимальная амплитуда их колебаний (около 10 К),

- с ростом толщины стенки КО (а соответственно и поверхностной плотности те-

плоемкости) амплитуда колебаний температур сглаживается, колебания незначительно сдвигаются по фазе, а при больших значениях толщины стенки (при $\Delta > 1$ мм) колебания практически затухают, и от начальной температуры $T_0 = 290$ К понижение температур осуществляется медленно – равновесная температура не достигается за десятки полных циклов,

- критерием большой толщины стенок, когда широтная зависимость температуры и альbedo

Земли уже не влияют на тепловой режим КО, можно считать значение $\Delta \geq 1$ мм,

- промежуточное значение $\Delta = 0,1$ мм (кривая 3) соответствует границе инерционности, когда примерно за 40 циклов устанавливается квазиравновесное состояние с малой амплитудой колебаний (менее 1 К),

- влияние только изменения альbedo Земли на колебания температур КО невелико (рис. 2), что обусловлено малым значением комбинированного коэффициента облученности φ_{ks} на всех высотах по сравнению с φ_s (табл. 1),

- колебания температуры КО осуществляются относительно температурного уровня несколько выше стационарного, определенного по формуле (9), что объясняется приращением альbedo Земли в полярных областях выше значения альbedo Бонда, принимаемого в расчетах за среднее,

- для безынерционного КО (с толщиной стенки менее 1 мкм) формула (10) обеспечивает точный расчет, что подтверждается сопоставлением с решением уравнения (6), а с ростом толщины стенки погрешность расчета по формуле (10), не учитывающей теплоемкость, нарастает.

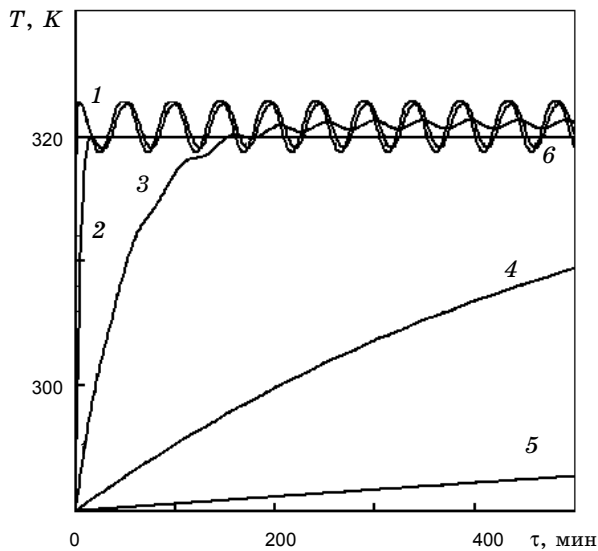


Рис. 3. Зависимость температуры КО с объемной теплоемкостью его материала $2,43 \times 10^6$ Дж/м³ К от времени при движении по солнечно-постоянной круговой орбите высотой 600 км ($t_0 = 96$ мин) при $T_0 = 290$ К и $\alpha_s = 1$. Кривая 1 соответствует характерному размеру 1 мкм, 2 – 10 мкм, 3 – 100 мкм, 4 – 1 мм, 5 – 10 мм. Прямая линия 6 соответствует стационарной температуре.

Формула (10) удобна для быстрых оценок максимально возможных амплитуд колебаний температур в зависимости от высоты орбиты.

На рис. 3, 4 представлены результаты аналогичных расчетов, но при $\alpha_s = 1$. Для этого случая все выводы остаются теми же, что по данным рис. 1, 2, но уровень температуры не падает, а растет относительно начального значения $T_0 = 290$ К, а размах температур значительно меньше (около 5 К).

На рис. 5 представлены зависимости переменной составляющей поглощенного теплового потока ΔQ_Σ внутри одного цикла обращения вокруг Земли при разных высотах орбиты и при $\alpha_s = 1$. Представление в виде зависимости от количества циклов позволяет для разных орбит исключить влияние различия периодов обращения. Провалы в максимуме на половине цикла соответствуют минимуму альbedo в экваториальной области. Как видно из этого рисунка, размах колебаний (двойная амплитуда) поглощаемой суммарной мощности равен 26 Вт/м².

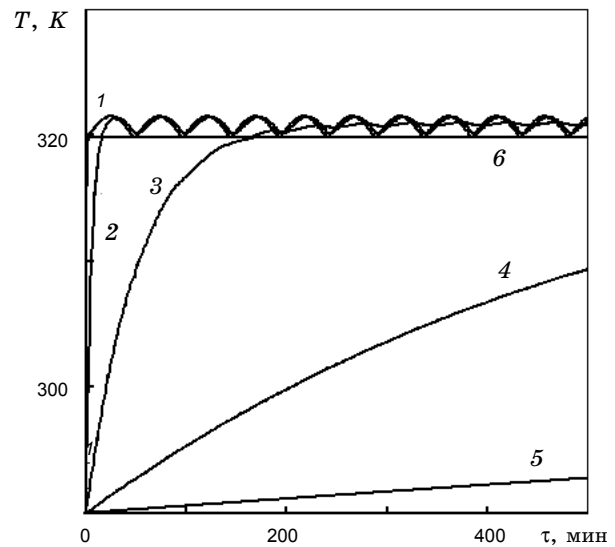


Рис. 4. Зависимость температуры КО с объемной теплоемкостью его материала $2,43 \times 10^6$ Дж/м³ К от времени при движении по солнечно-постоянной круговой орбите высотой 600 км ($t_0 = 96$ мин) при $T_0 = 290$ К и $\alpha_s = 1$. В расчетах учитывалось только изменение альbedo Земли, а мощность ее излучения принималась постоянной. Кривая 1 соответствует характерному размеру 1 мкм, 2 – 10 мкм, 3 – 100 мкм, 4 – 1 мм, 5 – 10 мм. Прямая линия 6 соответствует стационарной температуре.

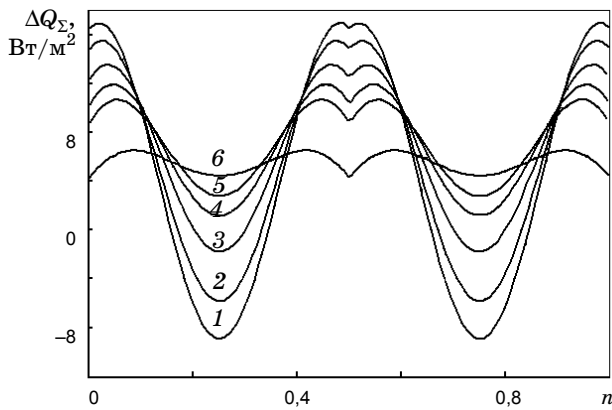


Рис. 5. Зависимость переменной составляющей поглощенной поверхностью безынерционного КО внешнего теплового потока в пределах периода обращения при $\alpha_s = 1$. Кривая 1 соответствует высоте 400, 2 – 600, 3 – 1000, 4 – 1500, 5 – 2000, 6 – 5000 км.

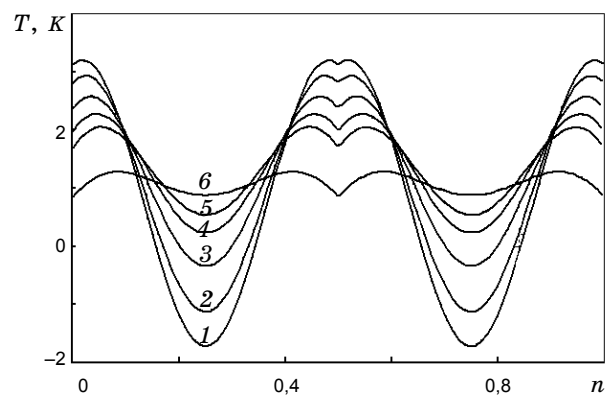


Рис. 6. Зависимость периодически изменяющегося приращения температуры безынерционного КО в пределах периода n при $\alpha_s = 1$. Кривая 1 соответствует высоте 400, 2 – 600, 3 – 1000, 4 – 1500, 5 – 2000, 6 – 5000 км.

На рис. 6 представлены зависимости в полупериоде приращений температур внутри цикла для безынерционного КО ($\Delta = 0$). Как видно из сопоставления рис. 5 и 6, приращения температур полностью отслеживают приращения поглощаемой мощности безынерционного КО. Размах колебаний температур составляет 5 К. Обе зависимости – $\Delta Q_s(n)$ и $\Delta T(n)$, сдвинуты относительно нуля в сторону положительных значений их приращений. Это объясняется систематической добавкой приращения альбедо относительно среднего его значения, соответствующего альбедо Бонда Земли.

Наибольший интерес для практики представляют КО с ненулевой теплоемкостью, т.е. с достаточно большой толщиной стенки, обеспечивающей жесткость и прочность конструкции. В табл. 2 представлены зависимости двойной амплитуды колебаний температур сферических оболочечных КО с различными

толщинами стенки от высоты. Значения амплитуд колебаний, представленные в табл. 2, округлены до одной значащей цифры в виду их малости (доли кельвинов). Из данных этой таблицы можно сделать следующие выводы:

- при достаточно большой толщине стенки КО (начиная с 1 мм, и тем более при 10 мм) колебания температур на высотах свыше 400 км не превышают 0,1 К,
- при $\alpha_s = 0,25$ амплитуды колебаний несколько больше, чем при $\alpha_s = 1$, что обусловлено сглаживанием колебаний на фоне большего температурного уровня при большом коэффициенте поглощения солнечного излучения, которое остается неизменным, при этом вклад в тепловой режим КО подсветки Земли менее значим,
- с ростом высоты орбиты колебания температур сглаживаются, что обусловлено меньшим вкладом в тепловой режим КО теплового

Таблица 2. Зависимость двойной амплитуды колебаний температуры КО с различной толщиной стенки от высоты орбиты h

h , км	$\alpha_s = 0,25$			$\alpha_s = 1$		
	$\Delta = 0,1$ мм	$\Delta = 1$ мм	$\Delta = 10$ мм	$\Delta = 0,1$ мм	$\Delta = 1$ мм	$\Delta = 10$ мм
400	0,9	0,09	0,009	0,8	0,08	0,008
600	0,85	0,09	0,008	0,7	0,07	0,006
1000	0,8	0,08	0,007	0,5	0,05	0,006
1500	0,7	0,07	0,006	0,4	0,03	0,005

потока от Земли при неизменной мощности прямой солнечной подсветки,

• двойная амплитуда колебаний температур практически обратно пропорциональна определяющему размеру – толщине стенки сферического оболочечного КО.

Выводы

Проведенные исследования были направлены на изучение основных закономерностей процесса отклонения от состояния теплового равновесия сферического оболочечного КО. Однако следующие выводы будут распространяться на КО произвольной выпуклой конфигурации при его движении по солнечно-синхронной орбите, на которой могут наблюдаться максимальные влияния неоднородностей подсветки Земли.

Основные выводы можно сформулировать в следующем виде.

1. Из сопоставления вкладов температурных неоднородностей и неоднородностей альbedo по меридиональной координате в суммар-

ную поглощаемую поверхностью КО мощность теплового потока излучения Земли, Солнца и отраженного Землей солнечного излучения можно сделать вывод о малом вкладе неоднородности альbedo в колебания поглощаемого потока, а тем более, температуры КО даже при максимально возможном изменении альbedo. Наибольшее влияние на нестационарность температуры КО может оказывать неоднородность температур и, соответственно, излучаемого Землей теплового потока.

2. Влияние исследуемых неоднородностей на колебания температуры КО при характерном размере более 0,1 мм уменьшается обратно пропорционально его характерному размеру, а также уменьшается с ростом высоты орбиты.

3. Основным результатом исследований является вывод о том, что для КО с толщиной стенки, достаточной для обеспечения его жесткости и прочности, никакие влияния неоднородностей земной подсветки можно не учитывать. Эти влияния могут быть заметными только для безынерционных тонкопленочных объектов.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды / Под ред. Петрова Г. И. М.: Машиностроение, 1971. 382 с.
2. Каменев А.А., Лаповок Е.В., Ханков С.И. Аналитические методы расчета тепловых режимов и характеристик собственного теплового излучения объектов в околоземном космическом пространстве. Малая оперативная полиграфия НТЦ им. Л.Т. Тучкова, 2006. 186 с.
3. Цыпкин Ю.В., Гаврилов Е.В., Ханков С.И., Лаповок Е.В., Богоявленский А.И., Волюнкин В.М. Космический телескоп // Патент РФ на полезную модель № 102120, приоритет от 30.07.2010.
4. Trenberth K.E., Fasullo J.T., Keihl J. Earth's global energy budget // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2009. V. 90. № 3. P. 311–323.
5. Дульнев Г.Н., Семяшкин Э.М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. Л.: Энергия, 1968. 360 с.
6. Дульнев Г.Н., Парфенов В. Г., Сигалов А.В. Методы расчета теплового режима приборов. М.: Радио и связь, 1990. 312 с.
7. Богомолов С. И. Введение в специальность «Радиосвязь, радиовещание и телевидение» / Учебное пособие. Томск: ТМЦДО, 2004. 162 с