

УДК 520.224.2. 224.4

ВЫСОТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЕМПЕРАТУРЫ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

А.М. Дзитолев^а, Е.В. Лаповок^а, С.И. Ханков^а

^а Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия, dzitoi8@gmail.com

Исследован тепловой баланс сферического космического объекта в околоземном космическом пространстве. Получено аналитическое описание стационарной средней температуры такого объекта с учетом наличия внутренних источников тепловыделений и поглощаемого его поверхностью солнечного излучения. Математическая модель, описывающая тепловой баланс космического объекта, представлена единым уравнением, сочетающим две частные модели. Одна модель учитывает, помимо теплоотдачи излучением от объекта в космическое пространство, также и излучение в сторону Земли. Вторая учитывает только затенение Землей потока излучения в космическое пространство. Выбор модели определяется направлением результирующего потока излучения между объектом и Землей. Получены функции, описывающие высотные зависимости температуры космического объекта сферической формы. В тени Земли выбор модели и формул, описывающих температуру космического объекта, определяется величиной удельной мощности тепловыделений и его температурным уровнем. На солнечном участке траектории выбор вида высотной функции зависит также от отношения коэффициента поглощения солнечного излучения к степени черноты поверхности объекта. Предложены критерии, позволяющие до начала расчетов выбирать вид функции, описывающей относительное изменение температуры объекта с ростом высоты. Представлены результаты расчетов, проведенных с использованием высотных функций, вытекающих из двух моделей, и указаны границы применимости этих функций. Выведенные аналитические формулы позволяют вычислять температуру сферического космического объекта. Полученные выводы справедливы для объектов выпуклой формы типовых конфигураций.

Ключевые слова: тепловой баланс, космический объект, тепловой режим объекта в околоземном космическом пространстве.

HIGH-RISE TEMPERATURE DEPENDENCES FOR ISOTHERMAL SPACE OBJECT OF THE SPHERICAL FORM

A.M. Dzitoev^a, E.V. Lapovok^a, S.I. Khankov^a

^а Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia, dzitoi8@gmail.com

Thermal balance of spherical space object in a near-earth space is investigated. Analytical description of stationary average temperature of such object in view of the existence of internal sources of thermal emissions and sunlight absorbed by its surface is received. Mathematical model, describing thermal balance of space object, is presented by the uniform equation combining two private models. One model considers heat irradiation from the object into space and radiation towards the Earth as well. The second one considers a shielding of a radiation stream into space by the Earth only. The choice of a model is defined by the direction of resultant radiation stream between object and the Earth. Functions describing high-rise dependences of temperature for space object of the spherical form are received. In the Earth shadow the choice of a model and the formulas, describing temperature for space object, is defined by the value of specific power of thermal emissions and its temperature level. On a solar site of a trajectory the choice of high-rise function type depends also on the ratio between coefficient of sunlight absorption and the degree of blackness for object surface. Criteria are offered making it possible to choose the function type, describing the relative change of object temperature with the height growth, prior to the beginning of calculations. Results of calculations carried out with the usage of high-rise functions, following from two models, are presented, and the limits of applicability for these functions are specified. Deduced analytical formulas give the possibility to calculate the temperature of spherical space object. Received conclusions are correct for convex form objects of standard configurations.

Keywords: thermal balance, space object, object thermal mode in a near space.

Введение

При проектировании космических аппаратов и средств обеспечения их тепловых режимов повсеместно используются численные методы расчетов [1–5]. На создание специальных программ затрачиваются большие усилия и средства. Актуальным направлением исследований закономерностей формирования тепловых режимов космических объектов (КО) является разработка аналитических методов расчета [6–12]. Для расчетов температур КО в околоземном космическом пространстве (ОКП) необходимо определение величин падающих на КО и отдаваемых им лучистых тепловых потоков [6, 7].

Для КО типовых конфигураций ранее были разработаны методы расчетов нестационарных температур при их движении по различным орбитам для случая отсутствия внутренних источников тепловыделений [7–9]. Однако наличие источника тепловой мощности, отводимой внешней поверхностью КО излучением, может изменить зависимости его температуры от высоты орбиты. Относительные или безразмерные высотные зависимости стационарных температур КО от высоты орбиты следует рассматривать как важнейшие характеристики. Они позволяют определять общие закономерности формирования тепловых режимов для КО различных конфигураций и с различными коэффициентами поглощения их поверхностей в спектре как инфракрасного теплового, так и солнечного излучения.

Ранее были исследованы коэффициенты облученности тепловым излучением Земли КО цилиндрической и конической формы [13, 14], а также тепловое подобие КО указанных конфигураций и КО сферической формы. Все КО выпуклой формы с некоторой степенью приближения и в рамках опреде-

ленного диапазона изменения их геометрических параметров можно привести к одной из типовых конфигураций. Однако наиболее наглядный результат может быть получен на примере КО сферической формы без потери общности получаемых выводов.

Целью настоящей работы являлась разработка аналитической методики расчетов высотных зависимостей температур КО сферической формы на основе исследования его полного теплового баланса с учетом всех тепловых воздействий в ОКП и при наличии в нем внутренних тепловыделений.

Физическая модель теплового взаимодействия КО с Землей

В ОКП на КО воздействуют три внешних потока излучения, которые формируют его тепловой баланс и температурный уровень: собственное тепловое излучение Земли, прямое и отраженное Землей солнечное излучение. Необходимо отметить различия природы этих излучений. Прямая солнечная заливка определяется только солнечной постоянной, а удельный поглощаемый КО поток солнечного излучения зависит только от коэффициента поглощения поверхности КО. Отраженное Землей солнечное излучение определяется солнечной постоянной, величиной альбедо Земли и углом на Солнце. Данный угол определяет величину комбинированного коэффициента облученности КО, равного отношению падающего на поверхность КО светового потока к величине интегрального потока солнечного излучения, отраженного Землей во всех направлениях.

Собственное тепловое излучение Земли отличается от первых двух указанных факторов теплового воздействия (связанных с солнечным излучением) тем, что между Землей и КО осуществляется теплообмен излучением в спектре собственного теплового излучения Земли. Это означает, что теплоотдача от КО в общем случае, при высокой температуре КО, может осуществляться в холодное космическое пространство и в направлении Земли (обратный поток излучения). В то же время в спектре солнечного излучения никакое обратное взаимодействие между КО и Землей не требует учета. Исходя из этого, необходимо отдельное рассмотрение модели тепловой подсветки КО собственным тепловым излучением Земли.

На рис. 1 представлена схема для описания теплового взаимодействия КО с Землей и холодным космосом. На рис. 1, а, представлена модель подсветки КО Землей. С поверхности КО Земля видна под углом $2\theta_0$ (половинный угол θ_0 используется в расчетах коэффициента облученности КО [6]). Размер КО настолько меньше размера земного шара, что в указанном масштабе КО может быть представлен только в виде точки. На рис. 1, б, приведена модель подсветки сферического КО Землей в спектре ее собственного теплового излучения. При этом начало системы координат перенесено из центра Земли в центр КО (из точки O' в точку O). Диаметр сферического КО столь мал по сравнению с диаметром Земли, что для любой точки поверхности КО в поперечном направлении можно считать, что подсветка Землей осуществляется строго из одного и того же направления и в пределах одного и того же угла $2\theta_0$.

На рис. 1, в, схематически изображены вложенные друг в друга подобные конусы, ограничивающие телесные углы, под которыми с различных точек поверхности КО видна Земля. Величины отрезков EF , EO и ED пренебрежимо малы по сравнению с отрезком OG на рис. 1, а, равным высоте КО над поверхностью Земли. Исходя из этого, при расчете интегрального коэффициента облученности привязка к конкретной точке поверхности сферического КО в вертикальном направлении не имеет значения.

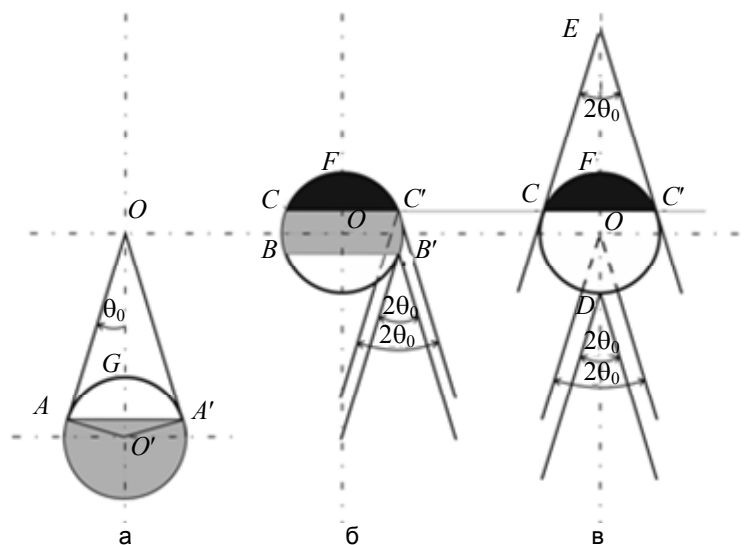


Рис. 1. Схема подсветки космического объекта собственным тепловым излучением Земли: модель подсветки КО участком поверхности Земли в пределах дуги AGA' (а); модель подсветки участков поверхности сферического объекта тепловым излучением Земли (б); схема облученности сферического космического объекта тепловым излучением Земли в пределах линейного угла $2\theta_0$, под которым

из сферического объекта видна Земля (в)

На основе изложенного обоснования инвариантности положения вершины конуса в любой точке КО можно распространить те же соображения при расчетах затенения Землей теплового излучения КО в пределах того же конуса.

Задача решалась в рамках допущений изотермичности поверхности Земли и ламбертовских законов отражения, а также изотермичности КО.

Математическая модель радиационного теплообмена КО в ОКП

Уравнение теплового баланса КО в общем случае имеет вид

$$q_0 + q_s + q_e = Q + Q_w + Q_s + Q_e, \quad (1)$$

где q_0 – изменение теплосодержания КО, определяемого через поверхностную плотность теплоемкости [7]; q_s – удельный тепловой поток, излучаемый КО в космическое пространство; q_e – результирующий удельный тепловой поток, определяющий сброс избыточной тепловой энергии от КО в сторону Земли; Q – удельный тепловой поток излучения Земли, поглощаемый поверхностью КО; Q_w – поверхностная плотность мощности тепловыделений на внешней поверхности КО, обусловленная действием внутренних источников тепловой энергии; Q_s – удельный тепловой поток прямой солнечной засветки, поглощенный поверхностью КО; Q_e – удельный тепловой поток отраженного Землей солнечного излучения, поглощенный поверхностью КО.

Для упрощения анализа рассмотрим стационарный тепловой режим, что не ограничивает общности выводов. В этом случае $q_0 = 0$. Рассмотрим остальные компоненты теплового баланса в (1) по отдельности.

Величина q_s определяется из соотношения

$$q_s = \varepsilon \frac{\Omega_s}{4\pi} \sigma T^4, \quad (2)$$

где ε – степень черноты поверхности КО; Ω_s – телесный угол, в пределах которого КО излучает в космическое пространство; σ – постоянная Стефана–Больцмана; T – температура на поверхности КО.

Результирующий поток q_e описывается выражением

$$q_e = \varepsilon \frac{\Omega_e}{4\pi} \sigma (T^4 - T_e^4), \quad (3)$$

где Ω_e – телесный угол, под которым с КО видна Земля; T_e – эффективная температура Земли, $T_e = 254,8$ К [15].

Поглощаемый поверхностью КО удельный тепловой поток Q определяется по формуле [6, 7]

$$Q = \varepsilon \varphi_c Q_0, \quad (4)$$

где φ_c – коэффициент облученности поверхности сферического КО Землей; Q_0 – удельный тепловой поток, излучаемый Землей на верхней границе атмосферы, $Q_0 = 239$ Вт/м² [15].

Поглощаемый удельный тепловой поток прямого солнечного излучения вычисляется по формуле [7]

$$Q_s = \alpha_s \Phi E, \quad (5)$$

где α_s – коэффициент поглощения поверхностью КО солнечного излучения; Φ – отношение площади миделя засвечиваемой Солнцем поверхности КО к его полной площади поверхности, для сферы $\Phi = 0,25$; E – солнечная постоянная, $E = 1366$ Вт/м².

Удельный поток поглощаемого поверхностью КО отраженного Землей солнечного излучения описывается соотношением

$$Q_e = \alpha_s \varphi_k A E, \quad (6)$$

где φ_k – комбинированный коэффициент облученности КО, равный отношению падающего на КО удельного потока солнечного излучения, отраженного Землей, к солнечной постоянной; A – глобальное альbedo Земли, $A = 0,3$ [15].

Телесный угол Ω_e , входящий в формулу (3), выражается через половинный линейный угол θ_0 , под которым с поверхности КО видна Земля, с помощью соотношения

$$\Omega_e = 2\pi(1 - \cos \theta_0) = 2\pi(1 - \sqrt{1 - \sin^2 \theta_0}). \quad (7)$$

Угол θ_0 может быть выражен через коэффициент облученности Землей площадки, лежащей в плоскости местного горизонта φ_0 , формулой [6]

$$\theta_0 = \arcsin \sqrt{\varphi_0}; \quad \varphi_0 = \left(\frac{R}{R+h} \right)^2, \quad (8)$$

где R – средний радиус Земли, $R = 6371$ км; h – высота КО над поверхностью Земли.

Коэффициент облученности φ_0 описывает рассеяние фронта сферической волны излучения Земли на удалении от нее на расстояние h .

Коэффициент облученности сферического объекта тепловым излучением Земли φ_c выражается через φ_0 соотношением [7]

$$\varphi_c = 0,5 \left(1 - \sqrt{1 - \varphi_0} \right). \quad (9)$$

Подставив (8) в (7), с учетом (9) получим

$$\Omega_e = 4\pi\varphi_c. \quad (10)$$

С учетом очевидного равенства

$$\Omega_s + \Omega_e = 4\pi \quad (11)$$

можно получить выражение для Ω_s . Из (10) и (11) следует, что

$$\Omega_s = 4\pi(1 - \varphi_c). \quad (12)$$

Подставим (12) и (10) в (2) и (3), а затем (2)–(6) в (1), получим уравнение

$$(1 - \varphi_c) \sigma T^4 + k \varphi_c \sigma (T^4 - T_e^4) = \varphi_c Q_0 + \frac{Q_w}{\varepsilon} + \alpha_s E (\Phi + A \varphi_k), \quad (13)$$

где k – коэффициент, определяемый следующими условиями:

$$k = \begin{cases} 1 & \text{при } T > T_e \\ 0 & \text{при } T \leq T_e \end{cases}. \quad (14)$$

Последнее условие необходимо для исключения двойного учета теплового влияния Земли в случае, когда $T < T_e$.

Аналитические функции для описания высотных зависимостей температуры КО

Решение уравнения (13) удобно представить в виде

$$T = T_e Y; \quad T_e = \sqrt[4]{\frac{Q_0}{\sigma}} = 254,8 \text{ К}; \quad Y = \sqrt[4]{F_e + F_s}; \quad (15)$$

$$F_e = \frac{(1+k)\varphi_c + N}{1 - (1-k)\varphi_c}; \quad F_s = n_s M \frac{\Phi + A\varphi_k}{1 - (1-k)\varphi_c}; \quad N = \frac{Q_w}{\varepsilon Q_0}; \quad M = \frac{E}{Q_0} = 5,715.$$

Принимая значение для сферы $\Phi = 0,25$ [7] и $A = 0,3$, получим конкретное выражение для F_s в случае абсолютно черной поверхности КО ($n_s = 1$) в виде

$$F_s = \frac{1,429 + 1,715\varphi_k}{1 - (1-k)\varphi_c}. \quad (16)$$

Аналитическая функция $Y(h)$ (15) представляет собой относительную высотную зависимость температуры КО. При $F_s = 0$ (16) функция Y (15) является частной функцией, описывающей относительное изменение температуры КО с ростом высоты в тени Земли.

Критерий выбора функции для описания высотных зависимостей температурного уровня КО

На солнечном участке траектории практически всегда реализуются условия, при которых необходимо принимать $k = 1$. Исключение составляют маловероятные ситуации, когда коэффициент поглощения солнечного излучения очень мал и $n_s \ll 1$.

Для случая нахождения КО в тени Земли соотношение для расчета температуры упрощается до

$$T = T_e f_i; \quad f_i = \sqrt[4]{F_e}. \quad (17)$$

В случае $k = 1$ высотная функция f_i из (17) примет вид

$$f_1 = \sqrt[4]{2\varphi_c + N}. \quad (18)$$

При $k = 0$ получим

$$f_2 = \sqrt[4]{\frac{\varphi_c + N}{1 - \varphi_c}}. \quad (19)$$

Зона действия высотной функции f_1 определяется из условия

$$f_1 > 1 \text{ или } N > 1 - 2\varphi_c. \quad (20)$$

Границей действия функций f_1 и f_2 является условие $f_1 = f_2 = 1$. Функция f_2 предназначена для описания противоположной ситуации, когда $f_2 < 1$.

Соотношение (20) совместно с условием (14) составляют критерий выбора модели теплообмена КО в ОКП, который определяет соответствующий выбор аналитической функции, описывающей высот-

ную зависимость температуры КО. Еще до начала расчетов температур КО следует установить выполнение или невыполнение неравенства (20), что позволит выбрать правильное значение k .

При $N = 0$ (при отсутствии внутренних тепловыделений) выполняется известное соотношение [7]

$$T = T_e \sqrt[4]{\frac{\Phi_c}{1 - \Phi_c}}. \quad (21)$$

Представляет интерес оценка мощности тепловыделений в КО, необходимой для выполнения условия (20), которую проведем для абсолютно черной поверхности КО, когда $\epsilon = 1$. При малой высоте орбиты $h = 200$ км и при $\Phi_c = 0,376$ получим $N > 0,25$, откуда $Q_w > 60$ Вт/м². При радиусе КО 1 м нетрудно получить требуемую суммарную мощность $P > 750$ Вт. Для больших высот соответствующие значения составляют $N > 1$, $Q_w > 239$ Вт/м² и $P > 3$ кВт. В результате оказывается, что в диапазоне изменения высот от низких до геостационарных следует использовать высотную функцию вида (18) в случае удельной мощности тепловыделений с поверхности КО от 60 до 240 Вт/м². В противном случае достаточно использовать высотную функцию вида (19), а при отсутствии тепловыделений в КО его температура в тени Земли определяется по формуле (21).

Результаты расчетов

На рис. 2 представлены зависимости температуры КО от высоты орбиты в тени Земли.

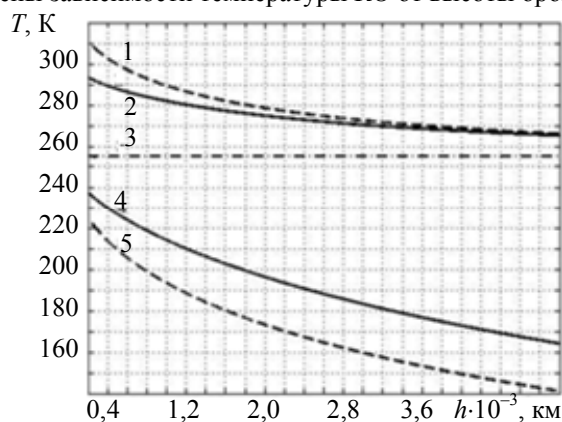


Рис. 2. Зависимость температуры КО от высоты над поверхностью Земли на теневом участке.

Линии 1 и 2 соответствуют наличию в КО внутренних тепловыделений с поверхностной плотностью мощности 239 Вт/м² ($N = 1$). Горизонтальной линией 3 отмечена эффективная температура Земли 254,8 К.

Линии 4 и 5 соответствуют случаю отсутствия тепловыделений. Сплошными линиями 2 и 4 даны зависимости, при расчете которых принято $k = 1$, штриховыми 1 и 5 – при $k = 0$

Посередине графика горизонтальной штрих-пунктирной линией отмечено значение эффективной температуры Земли 254,8 К. Кривые, лежащие выше этой линии, построены с использованием формулы (19) для случая наличия внутри КО источника тепловыделений, создающего на поверхности КО удельный тепловой поток, равный удельному тепловому потоку излучения Земли на верхней границе атмосферы 239 Вт/м² ($N = 1$). Ниже линии, соответствующей значению 254,8 К, приведены зависимости от высоты над Землей температуры КО при отсутствии в нем внутренних тепловыделений ($N = 0$). Сплошными линиями даны зависимости температур КО от высоты, построенные с учетом обратного потока от КО к Земле ($k = 1$), а штриховыми – без учета этого потока ($k = 0$).

Из рис. 2 можно сделать следующие выводы об основных закономерностях формирования теплового баланса и температурного уровня КО в тени Земли.

1. При наличии в КО внутренних тепловыделений его температуры во всем диапазоне изменения высот лежат выше уровня 254,8 К – по данным расчетов, вплоть до высоты 40000 км, когда $T = 255,4$ К. В этом случае разные модели – учитывающая и не учитывающая обратный результирующий поток от КО к Земле ($k = 1$ и $k = 0$) – приводит с погрешностью менее 1 К к одному и тому же результату при высотах свыше 3000 км. Это означает, что на больших высотах тепловое влияние Земли снижается, а тепловой баланс КО определяется главным образом его теплоотдачей в космическое пространство при полностью преобладающем влиянии в приходной части баланса внутренних тепловыделений.
2. При наличии в КО внутренних тепловыделений на малых высотах (до 3000 км) следует учитывать теплоотдачу от КО к Земле, особенно это необходимо при высотах от 200 до 2000 км, в противном случае погрешность определения температуры КО может составлять от 2 до 18 К.
3. При отсутствии внутренних тепловыделений в КО следует использовать высотную зависимость температуры, описываемую аналитической формулой (21), т.е. без учета обратного теплового потока от КО к Земле. В данном случае сплошная линия приведена для иллюстрации возможных завышений

температур КО при использовании модели, не соответствующей физическому смыслу. При высоте 40000 км значения температур для сплошной и штриховой линий составляют 79,6 и 67 К соответственно.

Заключение

На основе исследования теплового баланса космического объекта сферической формы получена новая общая аналитическая формула для расчета высотных зависимостей его температуры при наличии внутренних тепловыделений с учетом поглощаемой солнечной энергии и теплообмена с Землей. Выбор частной упрощенной расчетной формулы определяется по критерию соотношения между температурой объекта и эффективной температурой Земли.

Даже при наличии внутренних тепловыделений в тени Земли, если не выполняется условие (20), расчет проводится по традиционным методикам, изложенным в [7]. Высотная функция вида (19) может использоваться для космического объекта с абсолютно черной поверхностью, если поверхностная плотность мощности, выделяемая его наружной поверхностью, менее 60 Вт для низких орбит и 240 Вт для высоких орбит. Однако при уменьшении степени черноты указанные значения поверхностной плотности мощности снижаются пропорционально значению степени черноты. Исходя из этого, для всего высотного диапазона может оказаться достаточным значение $Q_w = 25 \text{ Вт/м}^2$ при $\epsilon = 0,1$, что для объекта радиусом 1 м соответствует полной мощности тепловыделений до 300 Вт. В этом случае необходимо использовать высотную функцию вида (18).

Для упрощения анализа и получения результатов в наиболее наглядном виде исследования проведены для космического объекта сферической формы. Тем не менее, полученные результаты являются общими и для объекта любой выпуклой формы. При этом будут изменяться конкретные значения коэффициентов облученности и удельные мощности тепловыделения, разделяющие области применения моделей. Выводы распространяются и на случай нестационарного теплового режима космического объекта.

Литература

1. Малоземов В.В. Тепловой режим космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1980. 232 с.
2. Космические аппараты / Под общ. ред. К.П. Феоктистова. К71 М.: Воениздат, 1983. 319 с.
3. Салахутдинов Г.М. Тепловая защита в космической технике. М.: Знание, 1982. 64 с.
4. Авдеевский В.С., Галицкий Б.М., Глебов Г.А. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике: Учебник для авиационных специальностей вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 528 с.
5. Залетаев В.М., Капинос Ю.В., Сургучев О.М. Расчет теплообмена космического аппарата. М.: Машиностроение, 1971. 317 с.
6. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды / Под ред. Г.П. Петрова. М.: Машиностроение, 1971. 382 с.
7. Каменев А.А., Лаповок Е.В., Ханков С.И. Аналитические методы расчета тепловых режимов и характеристик собственного теплового излучения объектов в околоземном космическом пространстве. СПб: НТЦ им. Л.Т. Тучкова, 2006. 186 с.
8. Баёва Ю.В., Лаповок Е.В., Ханков С.И. Методика расчета нестационарных температур космического объекта на круговых орбитах // Известия ВУЗов. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 12. С. 51–56.
9. Баёва Ю.В., Лаповок Е.В., Ханков С.И. Методика расчета нестационарных температур космического объекта, движущегося по эллиптической орбите // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 6 (88). С. 67–72.
10. Баёва Ю.В., Лаповок Е.В., Ханков С.И. Аналитическая методика расчета тепловых потоков в околоземном космическом пространстве, формирующих тепловой режим космических телескопов // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 5. С. 30–37.
11. Баёва Ю.В., Лаповок Е.В., Ханков С.И. Метод поддержания заданного температурного диапазона космического аппарата, движущегося по круговой орбите с заходом в тень Земли // Известия ВУЗов. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 7. С. 56–61.
12. Лаповок Е.В., Ханков С.И. Аналитическое описание нестационарных температур изотермического объекта в условиях его лучистого теплообмена с окружающей средой // Известия ВУЗов. Приборостроение. 2012. Т. 55. № 3. С. 56–60.
13. Дзитолев А.М., Ханков С.И. Методика расчета коэффициентов облученности цилиндрического космического объекта подсветкой Земли // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 1 (89). С. 145–150.
14. Дзитолев А.М., Ханков С.И. Тепловое подобие космических объектов типовых конфигураций // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 2 (90). С. 130–136.

15. Trenberth K.E., Fasullo J.T., Keihl J. Earth's global energy budget // Bulletin of the American Meteorological Society. 2009. V. 90. № 3. P. 311–323.

- Дзитолев Азамат Миронович* – адъюнкт, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия, dzitoi8@gmail.com
- Лаповок Евгений Владимирович* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия, leva0007@rambler.ru
- Ханков Сергей Иванович* – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия, Leva0007@rambler.ru
- Azamat M. Dzitoev* – postgraduate, Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia, dzitoi8@gmail.com
- Evgeniy V. Lapovok* – senior research scientist, PhD, Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia, leva0007@rambler.ru
- Sergey I. Khankov* – chief staff scientist, D.Sc., Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia, Leva0007@rambler.ru

Принято к печати 25.02.2014
Accepted 25.02.2014