

КОЛЕБАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ СО СТАБИЛИЗИРОВАННОЙ ОСЬЮ НА КРУГОВОЙ СОЛНЕЧНО-ПОСТОЯННОЙ ОРБИТЕ

А. М. ДЗИТОВЕВ, Е. В. ЛАПОВОК, М. М. ПЕНЬКОВ, С. И. ХАНКОВ

*Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: leva0007@rambler.ru*

Предложена методика расчета нестационарной температуры изотермического космического объекта цилиндрической формы с осью, стабилизированной в мировой системе координат, движущегося по круговой солнечно-постоянной орбите в плоскости терминатора. К такому классу объектов может относиться корпус телескопа трубчатой конструкции, ось которого постоянно ориентирована в направлении на удаленный объект, например, звезду. Колебания уровня температуры объектов такого класса определяются периодическими изменениями эффективного коэффициента облученности, которые воспроизводятся от цикла к циклу полного периода обращения объекта вокруг Земли. Колебания температур в случае больших значений постоянной термической инерции, достигаемых при достаточно большой толщине стенки цилиндра, могут осуществляться с временной задержкой относительно изменений внешних тепловых воздействий, определяемых варьированием коэффициента облученности. С ростом высоты орбиты средние значения эффективных коэффициентов облученности существенно уменьшаются — от десятых долей на 600 км до сотых долей на 10 000 км и до тысячных долей на геостационарной орбите. Одновременно снижается размах колебаний эффективных коэффициентов облученности, при этом возрастает вклад в энергетический баланс космического объекта мощности поглощаемого солнечного излучения. С ростом высоты от 600 до 40 000 км температурный уровень объекта с абсолютно черной поверхностью понижается на 35 К, амплитуда колебаний при этом уменьшается от 5,6 до 0,4 К.

***Ключевые слова:** космический объект, солнечно-постоянная орбита, нестационарный тепловой баланс космического объекта, тепловое излучение Земли, эффективный коэффициент облученности*

Введение. Изучение закономерностей формирования тепловых режимов космических объектов (КО), в том числе телескопов, является актуальным направлением космических исследований [1—4]. Ранее нами были исследованы тепловые режимы КО сферической формы, а также осесимметричных конфигураций — цилиндрической и конической — в условиях постоянной ориентации их осей относительно плоскости местного горизонта (ПМГ) [5—10]. Причиной изменения температуры являлось варьирование внешних тепловых воздействий при движении таких объектов по траекториям с разной высотой над поверхностью Земли [11, 12]. Существенно изменяется температура при движении объекта по траекториям с периодическим заходом в тень Земли и выходом из нее [13, 14].

Формирование нестационарного энергетического баланса и теплового режима зависит от изменяющегося во времени воздействия на КО теплового излучения Земли при движении объекта по круговой орбите в плоскости терминатора, когда колебания поглощаемой мощности земной подсветки определяются только колебаниями оси цилиндрического объекта относительно линии зенит—надир и соответственно ПМГ. Такая ситуация возникает при стабилизации оси цилиндра в мировой системе координат, например, при непрерывном наблюдении

телескопа за узкой областью космического пространства, в частности, за конкретной звездой.

Целью настоящего исследования являлось определение параметров, влияющих на динамику и амплитуду колебаний температуры движущегося по круговой орбите вокруг Земли КО цилиндрической формы при стабилизации его оси в направлении на выделенный участок космического пространства.

Физическая модель КО. Объектом исследований является оболочечный КО цилиндрической формы, толщина цилиндрической стенки которого равна толщине оснований. В этом случае толщина стенки КО совпадает с характеристическим размером, определяющим постоянную термической инерции [8, 9, 14].

На рис. 1 представлена схема движения цилиндрического КО вокруг Земли, когда ось КО стабилизирована в мировой системе координат (на рисунке — в вертикальном направлении). В положении I ось КО сливается с линией зенит—надир и угол между ними $\alpha = 0$. В первой четверти (от положения КО I до положения III включительно) угол α изменяется от 0 до $\pi/2$; во второй четверти (от положения III до IV) — от $\pi/2$ до π .

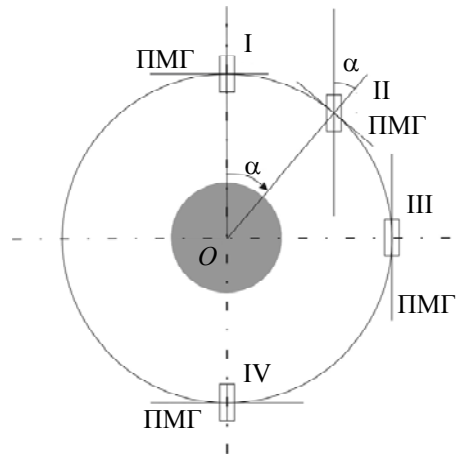


Рис. 1

В физической модели приняты следующие допущения и ограничения:

- объект выполнен из однородного изотропного материала;
- теплофизические свойства материала КО не зависят от температуры;
- поверхность КО абсолютно черная;
- КО движется вокруг Земли по круговой орбите в плоскости терминатора и вследствие постоянной солнечной подсветки его температура T всегда выше эффективной температуры Земли $T_e = 254,8$ К [15];
- Земля считается изотермическим шаром с постоянной поверхностной плотностью мощности излучения в широтном направлении [10];
- внутренние источники тепла в КО отсутствуют;
- ввиду малых величин эффективных комбинированных коэффициентов облученности цилиндрических объектов на полярных солнечно-постоянных орбитах [10] вкладом в энергетический баланс КО отраженного Землей потока солнечного излучения пренебрегаем.

Математическая модель. В соответствии с принятой физической моделью математическая модель КО цилиндрической формы описывается общим уравнением нестационарного теплообмена вида

$$t \frac{d\theta}{d\tau} + \theta^4 = 2\varphi + N\Phi; \quad (1)$$

$$t = \frac{c_0 L}{Q}; \quad Q = \sigma T_e^4; \quad \theta = \frac{T}{T_e}; \quad \Phi = \frac{F}{S}; \quad N = \frac{E}{Q},$$

где t — постоянная термической инерции КО при его температуре, равной T_e ; τ — текущее время; θ — безразмерная температура КО; φ — эффективный коэффициент облученности поверхности КО тепловым излучением Земли [7—10]; $N = 5,715$ — отношение солнечной постоянной $E = 1366 \text{ Вт/м}^2$ [15] к удельному потоку излучения поверхности Земли $Q = 239 \text{ Вт/м}^2$ [15]; Φ — фактор формы, равный отношению площади миделя КО F к полной площади его поверхности S [10, 14], c_0 — объемная теплоемкость материала КО, равная произведению удельной теплоемкости на плотность материала; L — определяющий размер КО; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$ — постоянная Стефана—Больцмана.

Начальная температура θ ($\tau = 0$) = θ_0 может быть задана произвольно.

Зависимость значений φ от угла наклона оси цилиндра α относительно линии зенит—надир является в рассматриваемом случае единственной причиной изменения температуры при движении КО по круговой орбите. При наклоне оси цилиндра относительно вертикальной оси зенит—надир на угол α (см. рис. 1) угол наклона элемента поверхности цилиндра ψ , задаваемый угловой координатой на цилиндрической поверхности ψ_c , отсчитываемой от образующей, наиболее близкой к Земле, может быть определен с использованием данных работ [7—10]:

$$\psi = \arccos x; \quad x = \sin \alpha \cos \psi_c. \quad (2)$$

В формулах для расчетов эффективных коэффициентов облученности КО цилиндрической формы [7—10] аргументом является параметр x — функция от угла α . Поскольку в рассматриваемом случае угол α является функцией времени, x в соотношениях (2) также является функцией времени, а при движении КО по круговой орбите выполняется условие

$$\alpha = 2\pi \frac{\tau}{t_0}, \quad (3)$$

где t_0 — период обращения КО вокруг Земли.

Величина t_0 зависит от высоты орбиты и описывается известным соотношением [5, 10], которое после подстановки в (3) приводит к конечному выражению вида

$$\alpha = 0,0747 \left(\frac{R}{R+h} \right)^{1,5} \tau, \quad (4)$$

где $R = 6371 \text{ км}$ — радиус Земли, h — высота круговой орбиты КО над поверхностью Земли, время τ — в минутах.

После прохождения временного участка переходного теплового режима устанавливается режим периодического повторения значения α внутри каждого цикла (периода обращения вокруг Земли). На установившемся временном участке удобно описывать колебания величины α и φ , а также температуры КО в виде функции не от времени, а от долей $n = \tau/t_0$.

Результаты расчетов. На рис. 2 приведены зависимости эффективного коэффициента облученности КО цилиндрической формы от доли периода обращения его вокруг Земли по круговой орбите высотой 600 км. Кривая 1 соответствует отношению радиуса основания цилиндра к высоте $k = 5$, 2 — 1/2, 3 — 1/6; кривая 4 соответствует интегральному коэффициенту облученности КО сферической формы.

Аналогичные расчеты проводились для разных высот орбиты. Для $h = 10\,000$ и $40\,000 \text{ км}$ значение φ колеблется относительно средней линии, примерно соответствующей интегральному коэффициенту облученности сферы φ_s , равному для указанных высот соответственно 0,04 и 0,0048. Характерной особенностью при всех высотах орбиты является пересечение зависимостей $\varphi(n)$ (для трех значений k) в точках с $n = 0,15$; 0,35; 0,65 и 0,85. Максимальная

амплитуда колебаний значений при $k = 5$ составляет примерно 0,12 для 600 км; 0,08 для 10 000 км и 0,006 для 40 000 км.

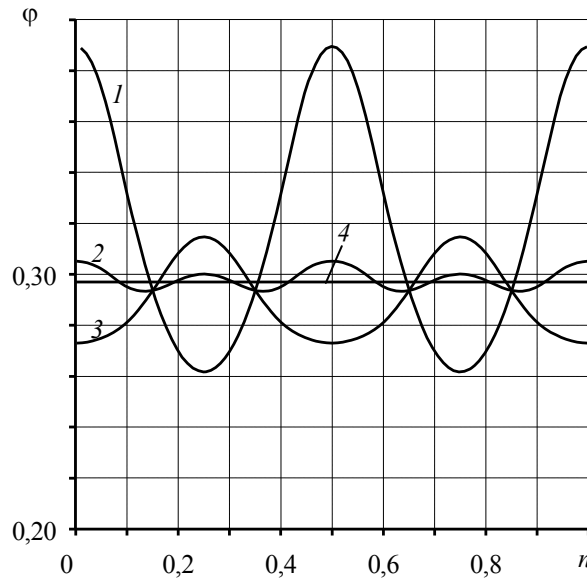


Рис. 2

На рис. 3 представлены зависимости температуры КО цилиндрической формы с абсолютно черной поверхностью при $k = 1/6$ от доли периода его обращения вокруг Земли по круговой орбите с высотой 600 км. Кривая 1 соответствует толщине стенки 1 мкм; 2 — 1 мм; 3 — 1 см. В расчетах принималось значение объемной теплоемкости материала КО $c_0 = 2,43 \cdot 10^6$ Дж/м³К.

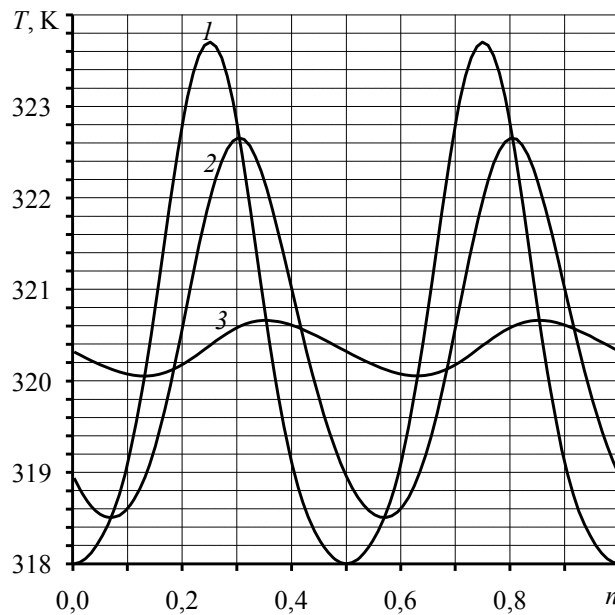


Рис. 3

Как видно из рис. 3, для трубчатого цилиндра с минимальной толщиной стенки $\Delta = 1$ мкм колебания температур внутри цикла полностью коррелируют с колебаниями эффективного коэффициента облученности (см. рис. 2). По мере увеличения толщины стенки и соответственно полной теплоемкости и постоянной термической инерции снижается размах колебаний температур, который составляет 5,6; 4,1 и 0,6 К при $\Delta = 1$ мкм, 1 мм и 1 см соответственно. При значениях Δ средний уровень температуры равен соответственно 320,8; 320,55 и 320,3 К. При $\Delta \geq 1$ мм колебания значений T не синхронны с колебаниями ϕ . Возрастание с увеличением Δ временной задержки колебаний температуры относительно колебаний ϕ обусловлено

ростом термической инерции КО. При условиях, соответствующих рис. 3, температура сферического объекта постоянна — 304 К, что на 16 К ниже среднего значения температуры цилиндрического объекта при $k = 1/6$, хотя интегральный коэффициент облученности сферы примерно равен эффективному коэффициенту облученности цилиндра (рис. 2), это обусловлено меньшим значением Φ из уравнения (1) для сферы [10].

С ростом высоты h с 600 до 40 000 км средний уровень температуры снижается на 35 К. Разница значений температуры сокращается до незначительной величины 0,4 К. При этом температура трубчатого КО на 6 К выше температуры сферического КО.

Выводы. Результаты исследований показали, что стабилизация оси цилиндрического КО в мировой системе координат может служить источником значительных колебаний его температуры в большом диапазоне изменения высоты круговой орбиты. Это позволяет сделать вывод о необходимости принятия мер по термостабилизации телескопов с трубчатым корпусом, осуществляющих непрерывное наблюдение за конкретными звездами при движении космического аппарата по круговой орбите вокруг Земли. Решить эту проблему позволит применение активной системы термостабилизации, однако это потребует дополнительных энергетических затрат. Способствовать стабилизации уровня температуры может увеличение (до 1 см) толщины стенки корпуса телескопа, однако это приведет к повышению массы телескопа.

Представленные в статье методики и результаты расчетов могут использоваться в тепловом проектировании телескопов для КО, движущихся по круговой орбите со стабилизированной осью. Физическая и математическая модели, а также результаты расчетов справедливы для полого цилиндра с постоянной толщиной цилиндрической стенки и торцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Cullimore B. et al.* Automated Multidisciplinary Optimization of a Space-based Telescope // SAE 2002-01-2445. July 2002.
2. *Альтов В. В., Залетаев С. В., Копяткевич Р. М., Абросимов А. И.* Исследование теплового режима космических аппаратов оптического назначения // Космонавтика и ракетостроение. 2006. № 3 (44). С. 144—149.
3. *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.
4. *Баёва Ю. В., Лаповок Е. В., Ханков С. И.* Термооптическая абберация положения изображения в зеркальных телескопах // Оптический журнал. 2013. Т. 80, № 3. С. 30—36.
5. *Баёва Ю. В., Лаповок Е. В., Ханков С. И.* Методика расчета нестационарных температур космического объекта на круговых орбитах // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 12. С. 51—56.
6. *Дзгоев А. М., Лаповок Е. В., Ханков С. И.* Высотные зависимости температуры изотермического космического объекта сферической формы // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 3 (91). С. 119—125.
7. *Дзгоев 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.
8. *Дзгоев А. М., Лаповок Е. В., Ханков С. И.* Условия теплового подобия космических объектов конической и цилиндрической формы // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 12. С. 179—184.
9. *Дзгоев А. М., Лаповок Е. В., Ханков С. И.* Методы аналитического моделирования тепловых режимов космических объектов в околоземном космическом пространстве // Тр. ВКА им. А. Ф. Можайского. 2014. № 1 (642). С. 115—124.
10. *Дзгоев А. М., Лаповок Е. В., Ханков С. И.* Тепловые режимы космических объектов. СПб: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2016. 172 с.

11. Баева 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 (86). С. 67—72.
12. Дзитоев А. М., Лаповок Е. В., Ханков С. И. Аналитическая методика расчета нестационарной температуры сферического космического объекта при его движении по полярной эллиптической орбите // Тр. ВКА им. А. Ф. Можайского. 2014. № 2 (643). С. 98—106.
13. Баева Ю. В., Лаповок Е. В., Ханков С. И. Метод поддержания заданного температурного диапазона космического аппарата, движущегося по круговой орбите с заходом в тень Земли // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 7. С. 56—61.
14. 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.
15. Trenberth K. E., Fasullo J. T., Keihl J. Earth's global energy budget // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2009. Vol. 90, N 3. P. 311—323.

Сведения об авторах

- | | |
|-------------------------------------|---|
| Азамат Миронович Дзитоев | — ВКА им. А. Ф. Можайского; начальник лаборатории;
E-mail: dzitoi8@gmail.com |
| Евгений Владимирович Лаповок | — канд. техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского; ст. научный сотрудник;
E-mail: leva0007@rambler.ru |
| Максим Михайлович Пеньков | — д-р техн. наук, профессор; ВКА им. А. Ф. Можайского, начальник Академии; E-mail: vka@mil.ru |
| Сергей Иванович Ханков | — д-р техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского; ст. научный сотрудник;
E-mail: khankov@mail.ru |

Рекомендована
ВКА им. А. Ф. Можайского

Поступила в редакцию
28.09.16 г.

Ссылка для цитирования: Дзитоев А. М., Лаповок Е. В., Пеньков М. М., Ханков С. И. Колебания температуры изотермических цилиндрических объектов со стабилизированной осью на круговой солнечно-постоянной орбите // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 6. С. 545—551.

TEMPERATURE FLUCTUATIONS OF ISOTHERMAL CYLINDRICAL OBJECTS WITH STABILIZED AXIS IN CIRCULAR SOLAR-SYNCHRONIZED ORBIT

A. M. Dzitoev, E. V. Lapovok, M. M. Penkov, S. I. Khankov

A. F. Mozhaisky Military Space Academy, 197198, St. Petersburg, Russia
E-mail: leva0007@rambler.ru

A technique is proposed for calculations of non-stationary temperature of an isothermal space object of a cylindrical form with the axis stabilized in world system of coordinates, moving on a circular solar-synchronized orbit in the terminator plane. The class of objects under consideration includes a tubular-design telescope body with axis fixed in the direction to a remote object, e. g. a star. Temperature fluctuations for objects of the class are subject to periodic changes of effective irradiance coefficient reproduced in each cycle of the object revolution around the Earth. For a great value of fixed thermal inertia realized in the case of thick enough wall of the cylinder, the fluctuations may occur with a temporary delay relative to external thermal impacts determined by fluctuations of irradiance coefficient. Average values of the effective irradiation coefficient decrease significantly as the orbit height increases: from a few tenths for an orbit height of 600 km to hundredths at the orbit height of 10000 km, and to several thousandths for a geostationary orbit. At the same time, the fluctuations of the effective irradiance coefficients are diminished, and contribution caused by the power of absorbed solar radiation to the energy balance of the space object increases. When the height changes from 600 to 40 000 km, the temperature level of the object with a completely black surface is lowered by 35 K, while the oscillation amplitude decreases from 5.6 to 0.4 K.

Keywords: space object, solar-synchronized orbit, non-stationary thermal balance of a space object, thermal radiation of Earth, effective irradiance coefficient

Data on authors

- Azamat M. Dzitoev** — A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Head of Laboratory;
E-mail: dzitoi8@gmail.com
- Evgeny V. Lapovok** — PhD; A. F. Mozhaisky Military Space Academy; Senior Scientist;
E-mail: leva0007@rambler.ru
- Maxim M. Penkov** — Dr. Sci., Professor; A. F. Mozhaisky Military Space Academy, Head of the
Academy; E-mail: vka@mil.ru
- Sergey I. Knankov** — Dr. Sci.; A. F. Mozhaisky Military Space Academy; Senior Scientist;
E-mail: khankov@mail.ru

For citation: Dzitoev A. M., Lapovok E. V., Penkov M. M., Khankov S. I. Temperature fluctuations of isothermal cylindrical objects with stabilized axis in circular solar-synchronized orbit. *Journal of Instrument Engineering*. 2017. Vol. 60, N 6. P. 545—551 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-6-545-551