
ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

УДК 528.8:536.33
DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-12-993-998

УСЛОВИЯ ТЕПЛООВОГО ПОДОБИЯ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ КОНИЧЕСКОЙ И ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

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

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

Представлена методика расчета стационарных значений температур изотермических космических объектов конической и цилиндрической формы, движущихся по круговым орбитам в плоскости терминатора, а также находящихся в тени Земли. Исследованы условия теплового подобия объектов конической и цилиндрической формы. Установлено, что когда отношения радиуса оснований конического и цилиндрического объектов к их высоте равны, в случае значений половинных углов при вершине конуса $\beta \leq 10^\circ$, эти объекты имеют эквивалентные теплообменные характеристики, а также близкие значения температуры. При таких условиях значения температуры объектов цилиндрической и конической формы при высоте орбиты 600—40 000 км весьма близки, различие возрастает при половинных углах при вершине конуса более 20° и достигает 3 К и более. Установлено, что температура объекта сферической формы, выбранного в качестве эталонного в тех же условиях совпадает с температурой конического и сферического объектов только при углах ориентации осей конуса и цилиндра $\alpha = 40^\circ$ и 140° на солнечно-постоянной орбите, а в тени Земли — при $\alpha = 60^\circ$ и 120° .

***Ключевые слова:** космический объект, коэффициент облученности, тепловой баланс объектов в околоземном космическом пространстве, тепловое излучение Земли, тепловое подобие космических объектов.*

Введение. Исследование тепловых режимов движущихся в околоземном космическом пространстве (ОКП) космических объектов (КО) различных типовых конфигураций является актуальным и практически важным научным направлением. Несмотря на большое количество публикаций по этому направлению [1—11], закономерности формирования энергетических балансов и тепловых режимов КО остаются недостаточно изученными. При этом требуются методики расчетов, позволяющие достоверно определять значения температуры КО для разных геометрических параметров объектов и различной высоты над поверхностью Земли. Особенно актуальна разработка аналитических методов расчетов тепловых режимов КО: до настоящего времени такие исследования проводились только применительно к КО сферической формы, находящимся в тени Земли [12].

Цель настоящей работы — исследование и сопоставление стационарных значений температуры поверхности обладающего малой термической инерцией КО выпуклой формы (конус, цилиндр, сфера), передвигающегося в ОКП в условиях постоянной подсветки Солнцем в плоскости терминатора, а также в тени Земли.

Физическая модель КО на полярной круговой орбите. Исследовалась зависимость значений температуры поверхности КО цилиндрической и конической формы от ориентации их осей относительно плоскости местного горизонта (ПМГ) при их пребывании под углом 90° к направлению на Солнце.

Приняты следующие ограничения:

- источники тепла в КО отсутствуют;
- отношение коэффициента поглощения солнечного излучения к степени черноты поверхности КО равно единице;
- на солнечно-постоянных орбитах оси конуса и цилиндра ориентированы перпендикулярно направлению на Солнце;
- конические и цилиндрические объекты, как и выбранный эталоном объект сферической формы, являются полыми тонкостенными, обладающими малой термической инерцией, поэтому при нахождении в тени Земли в них быстро наступает стационарный тепловой режим;
- при сопоставлении тепловых режимов КО конической и цилиндрической формы принимается равенство отношений радиусов их оснований к высоте.

Сформулированные ограничения позволяют определить влияние только формы КО; дополнительные факторы, которые оказывают существенное влияние на температурный уровень КО, считаются неизменными.

Первое ограничение объясняется необходимостью поддержания постоянного по объекту и стационарного по времени уровня температуры КО на круговой геостационарной орбите, когда поглощение прямого солнечного излучения поверхностью объекта обеспечивает его достаточно высокую среднюю температуру. Этим поставленная в настоящей статье задача принципиально отличается от рассмотренной в работе [8], для решения которой требуется поддержание постоянного уровня температуры КО при изменении внешних тепловых воздействий, вызванном периодическим пребыванием КО в тени Земли при движении по круговой орбите. При наличии внутренних источников тепловыделений или использовании терморегулирующих покрытий КО с различными величинами коэффициентов поглощения и степеней черноты (что нарушает второе ограничение) влияние формы объектов на их температуру невозможно определить. Сопоставление температурных уровней КО, находящихся в тени Земли, также должно проводиться с учетом первых двух ограничений.

Последнее ограничение позволяет обеспечить геометрическое подобие КО конической и цилиндрической формы. Поскольку энергетический баланс в условиях ОКП не зависит от размеров КО [13], для геометрического подобия достаточно равенства отношений радиусов к высоте.

При составлении энергетического баланса КО предполагается, что Земля является изотермическим ламбертовским шаром с постоянной величиной альбедо по всей поверхности. Правомерность этого допущения обоснована в работе [7].

Методика расчета температуры КО с учетом их конфигурации, ориентации осей и высоты орбиты. При нахождении КО на круговой орбите в плоскости терминатора реализуется стационарный тепловой режим [6, 9]. При нахождении в тени Земли КО с малой термической инерцией также пребывает в стационарном тепловом состоянии. На солнечно-постоянной орбите, как показано в [6], комбинированный коэффициент облученности, определяющий величину отраженного Землей солнечного излучения, весьма мал и им можно пренебречь в расчетах. В указанных условиях формулу для расчета температуры T изотермического КО любой выпуклой конфигурации с учетом данных [12] удобно представить в виде

$$T = T_e \sqrt[4]{\frac{(1+k)\varphi + Nn_s\Phi}{1-(1-k)\varphi}}; \quad N = \frac{E}{Q}; \quad n_s = \frac{\alpha_s}{\varepsilon}; \quad \Phi = \frac{F}{S}, \quad (1)$$

где $T_e = 254,8$ К — эффективная температура Земли [14]; φ — эффективный коэффициент облученности поверхности КО тепловым потоком Земли [15, 16]; $E = 1366$ Вт/м² — солнечная постоянная; $Q = 239$ Вт/м² — удельный поток собственного теплового излучения Земли [14]; α_s — коэффициент поглощения солнечного излучения поверхностью КО; ε — степень черноты внешней поверхности КО; F — площадь миделя КО, подсвечиваемая Солнцем; S — площадь внешней поверхности КО.

Коэффициент k , учитывающий наличие результирующего теплового потока между КО и Землей, при $T > T_e$, равен единице, при $T \leq T_e$ — нулю. Для КО, находящихся в тени Земли, в уравнении (1) принимается $n_s = 0$, а также при отсутствии внутренних тепловыделений всегда выполняется условие $T < T_e$.

Для определения разницы температуры поверхности КО типовых конфигураций необходимо определить значения факторов формы Φ , а также зависимости коэффициентов облученности φ от высоты орбиты.

Для КО конической формы эффективный коэффициент облученности в случае равенства степеней черноты боковой поверхности и основания объекта с учетом известных формул [5, 9] удобно представить в виде

$$\varphi_k = \frac{\varphi_{\text{int}} + \varphi_b K \cos \beta}{1 + K \cos \beta}; \quad K = \frac{r}{L}, \quad (2)$$

где φ_{int} — интегральный коэффициент облученности боковой поверхности конуса; φ_b — коэффициент облученности торцевой поверхности конуса; r — радиус основания конуса; L — высота конуса; β — половинный угол при вершине конуса.

При $\beta = 0$ конус преобразуется в цилиндр и расчеты эффективного коэффициента облученности цилиндра можно проводить по формуле (2), принимая $\cos \beta = 1$. В этом случае φ_b представляет собой полусумму локальных коэффициентов облученности обоих торцов цилиндра.

Методика расчетов φ_{int} и φ_b для конуса и цилиндра изложена в работе [15], в которой сопоставлялись только их эффективные коэффициенты облученности, однако сопоставление значений температуры объектов не проводилось.

Для конического КО, ось которого ориентирована перпендикулярно направлению на Солнце, фактор формы определяется из соотношения

$$\Phi = \frac{\cos \beta}{\pi(1 + K \cos \beta)}. \quad (3)$$

Как и в случае формулы (2), при $\beta = 0$ формула (3) описывает фактор формы для цилиндрического КО.

При $K = 1/6$ факторы формы для цилиндра $\Phi_{\text{ц}} = 0,2728$, для конуса $\Phi_{\text{к}} = 0,2696$, для сферы $\Phi_{\text{с}} = 0,25$. Таким образом, $\Phi_{\text{ц}}$ больше $\Phi_{\text{к}}$ на 1 %, $\Phi_{\text{ц}}$ больше $\Phi_{\text{с}}$ на 8,4 %. Различие фигур с центральной симметрией (сфера) и осесимметричных фигур (цилиндр, конус) более значимо, чем различие осесимметричных фигур между собой.

Результаты расчетов. Расчеты проводились для КО конической, цилиндрической и сферической формы при высоте над поверхностью Земли от 600 до 40 000 километров.

На рис. 1 представлены зависимости средних значений температуры поверхности КО от угла наклона линии зенит—надир оси конуса (сплошные кривые) и цилиндра (пунктир), высота над поверхностью Земли 600 км. Расчеты выполнены для случая постоянного направления лучей Солнца перпендикулярно оси КО. Кривые соответствуют половинным углам при вершине конуса: 1 — $\beta = 5^\circ$; 2 — 10° ; 3 — 15° ; 4 — 20° . На рис. 2 представлены те же зависимости для случая нахождения объектов в тени Земли.

На рис. 3 представлены зависимости температуры поверхности КО от угла наклона относительно линии зенит—надир осей конуса (сплошные кривые) и цилиндра (пунктир) при

высоте над поверхностью Земли 40 000 км ($K=1/6$). Кривая 1 соответствует случаю направления излучения Солнца перпендикулярно осям КО в плоскости терминатора, 2 — в тени Земли, кривые 3 и 4 соответствуют сферическому объекту, находящемуся в 40 000 км от поверхности Земли соответственно на солнечном участке и в тени.

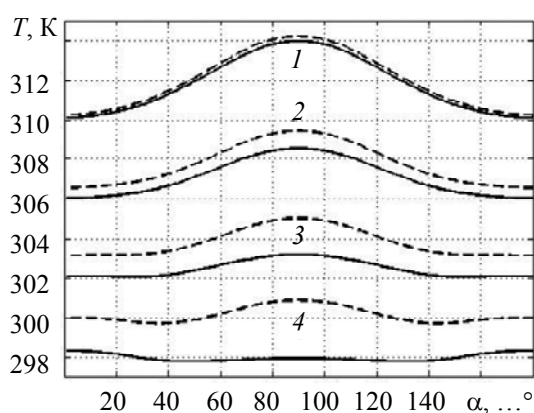


Рис. 1

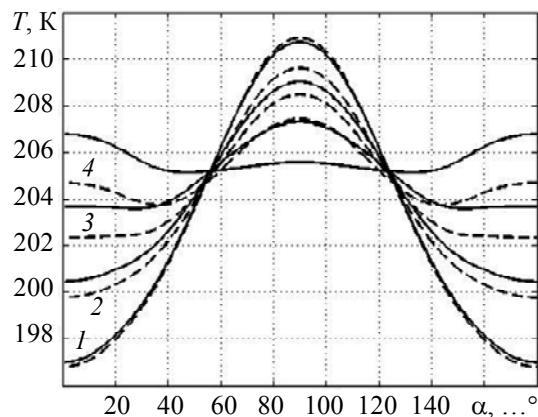


Рис. 2

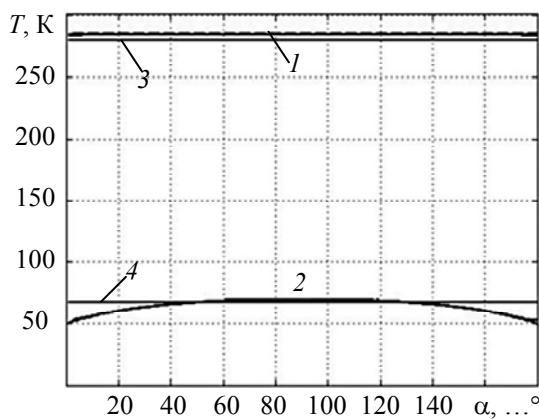


Рис. 3

Выводы. В результате проведенных исследований установлено, что при постоянной подсветке Солнцем и при нахождении в тени Земли значения температуры КО конической и цилиндрической формы весьма близки на всем диапазоне изменения высот над поверхностью Земли в случае половинных углов при вершине конуса не более 10° . На малых высотах влияние ориентации осей конуса и цилиндра минимально в случае постоянной подсветки Солнцем.

На больших высотах (40 000 км) значения температуры КО конической и сферической формы практически совпадают. В тени Земли температура конического и цилиндрического КО слабо зависит от ориентации осей объектов в диапазоне изменения $\alpha = 40\text{—}140^\circ$, при этом совпадая с температурой сферического КО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gilmore D. G. Spacecraft Thermal Control Handbook. El Segundo, CA: The Aerospace Press, 2002. 836 p.
2. Альтов В. В., Залетаев С. В., Конятевич Р. М., Абросимов А. И. Исследование теплового режима космических аппаратов оптического назначения // Космонавтика и ракетостроение. 2006. № 3 (44). С. 144—149.
3. Furukawa M. Practical method for calculating radiation incident upon a panel in orbit // J. Thermophysics. 1992. Vol. 6, N 1. P. 173—177.
4. Cullimore B., Panczak T., Baumann J., Genberg V., Kahan M. Automated Multidisciplinary Optimization of a Space-based Telescope // Society of Automotive Engineers. SAE 2002-01-2445. July, 2002.

5. Бондаренко В. А., Устинов С. Н., Немыкин С. А., Финченко В. С. Система обеспечения тепловых режимов малых космических аппаратов // Вестн. НПО им. С.А. Лавочкина. 2013. № 3 (19). С. 37—42.
6. Баёва Ю. В., Лаповок Е. В., Ханков С. И. Аналитическая методика расчета тепловых потоков в околоземном космическом пространстве, формирующей тепловой режим космических телескопов // Оптический журнал. 2013. Т. 80, № 5. С. 30—37.
7. Баёва Ю. В., Лаповок Е. В., Ханков С. И. Влияние широтных зависимостей температуры и альbedo Земли на тепловой режим изотермического космического объекта на солнечно-синхронной орбите // Оптический журнал. 2014. Т. 81, № 1. С. 17—24.
8. 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 // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 7. С. 56—61.
9. 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.
10. 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.
11. Тулин Д. В., Виноградов И. С., Шабарчин А. Ф., Привезенцев А. С., Гончаров К. А. Система обеспечения теплового режима космического радиотелескопа // Космические исследования. 2014. Т. 52, № 5. С. 423—428.
12. Дзитоев 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.
13. 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. Гучкова, 2006. 186 с.
14. 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.
15. Дзитоев 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.
16. Дзитоев А. М., Ханков С. И. Методика распознавания космических объектов плоской и выпуклой формы по их собственному тепловому излучению в тени Земли // Оптический журнал. 2015. Т. 82, № 4. С. 32—40.

Сведения об авторах

- Азамат Миронович Дзитоев** — адъюнкт; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра № 15; E-mail: dzitoi8@gmail.com
- Евгений Владимирович Лаповок** — канд. техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского, 43 отдел; старший научный сотрудник; E-mail: leva0007@rambler.ru
- Сергей Иванович Ханков** — д-р техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского, 43 отдел; старший научный сотрудник

Рекомендована ВКА

Поступила в редакцию
29.05.15 г.

Ссылка для цитирования: Дзитоев 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. 993—998.

**CONDITIONS FOR THERMAL SIMILARITY OF SPACE OBJECTS
OF CONICAL AND CYLINDRICAL SHAPE****A. M. Dzitoev, E. V. Lapovok, S. I. Khankov***A.F. Mozhaisky Military Space Academy, 197198, St. Petersburg, Russia
E-mail: leva0007@rambler.ru*

A method is developed for calculating stationary temperature values for isothermal space objects of conical and cylindrical shape moving along circular orbits in the plane of the terminator or staying in the Earth

shadow. Conditions for thermal similarity of conical and cylindrical objects are studied. It is shown that conical and cylindrical objects with equal relations of the radius of the basis to the height and half-angle at the cone vertex, β not exceeding 10° have equivalent thermal characteristics and close temperature values. Under the conditions, for orbits height of 600 – 40 000 km the temperatures of conical and cylindrical objects are close enough, the difference increases up to 3 K° and over when β is more than 20° . The temperature of spherical object taken as a reference one is found to coincide with the temperature of conical and cylindrical object at the same conditions only at angles of cone and cylinder axes orientation are $\alpha = 40^\circ$ and $\alpha = 140^\circ$ on a solar-constant orbit at $\beta=13^\circ$, and $\alpha = 60^\circ$ and $\alpha = 120^\circ$ correspondingly in the Earth shadow.

Keywords: space object, irradiation coefficient, thermal balance of objects in a near-earth space, the thermal radiation of the Earth, thermal similarity of space objects.

Data on authors

- Azamat M. Dzitoev** — Adjunct; A.F. Mozhaisky Military Space Academy, Department № 15; E-mail: dzitoi8@gmail.com
- Evgeniy V. Lapovok** — PhD; A.F. Mozhaisky Military Space Academy, Department № 43; Senior Scientist; E-mail: leva0007@rambler.ru
- Sergey I. Khankov** — Dr. Sci.; A.F. Mozhaisky Military Space Academy, Department № 43; Senior Scientist

For citation: *Dzitoev A. M., Lapovok E. V., Khankov S. I.* Conditions for thermal similarity of space objects of conical and cylindrical shape // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie*. 2015. Vol. 58, N 12. P. 993—998 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-12-993-998