УДК 528.8:536.33

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-2-156-162

КРИТЕРИИ ИЗОТЕРМИЧНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ПРИМЕРЕ ПОЛОГО КУБА В ТЕНИ ЗЕМЛИ

А. М. Дзитоев, 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 определения условий максимальной неизотермичности и полной изотермичности космического объекта в форме полого куба в тени Земли. Объект имеет оболочечную структуру с постоянной толщиной стенки, а его основание лежит в плоскости местного горизонта. На поверхность нижнего основания и боковую поверхность объекта падают потоки собственного теплового излучения Земли. Все наружные поверхности объекта излучают тепловую энергию в космическое пространство. Во внутренней полости объекта осуществляется теплообмен излучением между внутренними поверхностями. Все внутренние и наружные поверхности объекта принимаются абсолютно черными. Разработанная методика основана на определении диапазона изменения тепловой проводимости стенок равной толщины, для которого теплообмен между гранями куба определяется только внутренними переизлучениями и не зависит от тепловых проводимостей стенок. Этот случай соответствует предельно неизотермичному объекту. При этом должно проводиться определение средних температур каждой из поверхностей объекта с тонкой стенкой, когда влияние теплопроводности на выравнивание температур по поверхности объекта незначительно. Другой предельный случай соответствует изотермическому объекту.

Ключевые слова: тепловой режим космического объекта, неизотермический космический объект, околоземное космическое пространство, тепловое излучение Земли, коэффициенты облученности объекта Землей

Введение. К настоящему времени разработаны методы расчета средних температур космических объектов канонической конфигурации, движущихся по типовым орбитам вокруг Земли [1—8]. Такие расчеты основываются на использовании данных по тепловому излучению Земли [9—13]. Представляет самостоятельный интерес исследование космических объектов в форме параллелепипедов и кубов [14—16]. При расчетах теплообмена излучением во внутренней полости куба коэффициенты облученности рассчитывались по известным методикам [17].

В настоящей статье проведена классификация по критериям изотермичности на тонкостенный кубический объект (максимально неизотермический) и монолитный кубический объект (полностью изотермический). Для всех моделей принимается отсутствие внутренних тепловыделений в объекте. Исследования проводились применительно к находящемуся в тени Земли кубу, нижняя и верхняя грани которого расположены в плоскости местного горизонта.

Критерии неизотермичности и изотермичности объекта. Исследовалась зависимость температуры нижней грани куба и перепадов температур между нижней и верхней гранями куба от тепловой проводимости стенки полого куба:

$$\sigma_k = \lambda L_0; L_0 = 4c\Phi; \Phi = (1 - \chi)/(1 - 2\chi); \chi = c/L,$$
 (1)

где λ — коэффициент теплопроводности материала стенки куба; L_0 — характерный размер, соответствующий отношению эффективной площади сечения стенок, соединяющих нижнюю и верхнюю грани куба, к эффективному расстоянию между гранями; c — толщина стенки куба; L — размер стороны куба.

В пределах изменения аргумента $0 \le \chi \le 0.05$ функция $\Phi(\chi)$ с высокой точностью может быть представлена упрощенной зависимостью

$$\Phi = 1 + \chi. \tag{2}$$

Минимальное значение тепловой проводимости стенки выбиралось исходя из следующих соображений. Очевидно, что максимально возможный перепад температур между нижней и верхней гранями куба реализуется для бесконечно тонкой стенки куба (пленочная структура) [14]. В этом случае теплообмен между гранями куба осуществляется исключительно за счет излучения. При этом перенос тепловой энергии механизмом теплопроводности по стенкам из тонкой пленки исключен. Максимально возможный для тонкопленочной конструкции температурный перепад принимается в качестве базового значения. Как выяснилось в результате исследований, при увеличении толщины стенки до определенного уровня это значение остается постоянным. Из интервала значений толщины стенки куба и соответственно тепловой проводимости стенки выбирается такое, которое без технических трудностей обсчитывается численно. Таким условиям соответствуют $c = 5 \cdot 10^{-4}$ м при L = 1 м и $\lambda = 1$ Вт/(м·К). Это соответствует минимальной величине тепловой проводимости $\sigma_{min} = 0,002$ Вт/К.

Максимальное значение тепловой проводимости определялось для случая, когда перепад температур между нижней и верхней гранями куба равен нулю (условие изотермичности). Например, при c=0.3 м ($\Phi=1.75$) и $\lambda=140$ Вт/(м·К) максимальная величина тепловой проводимости равна $\sigma_{max}=294$ Вт/К, а перепад температур — практически нулю, в результате $\sigma_{max}/\sigma_{min}=1.47\cdot10^5$. Такой большой диапазон изменения величины тепловой проводимости требует применения логарифмического масштаба. Введем безразмерную величину

$$\sigma_0 = \sigma_k / 0.002,\tag{3}$$

а также ее логарифм

$$x = \lg \sigma_0 = \lg(2000\lambda c\Phi). \tag{4}$$

Распределение температур по граням куба рассчитывалось в среде ANSYS. Исследования проводились в двух вариантах: при учете теплообмена излучением между гранями во внутренней полости объекта и без учета лучистого теплообмена, когда предполагалось, что перенос тепловой энергии осуществляется только за счет механизма теплопроводности по стенкам. В результате исследований выявлены следующие закономерности.

- 1. Температурное распределение по каждой из граней неравномерное. На нижней грани температура максимальна в центральной зоне грани с некоторым спадом к краям, температуры боковых граней снижается в направлении от нижней грани к верхней, а на верхней грани температурное распределение максимально равномерное. С увеличением толщины стенок объекта и его высоты над поверхностью Земли повышается изотермичность граней. В качестве критерия степени изотермичности объекта в такой ситуации естественно принять разность между максимальной температурой нижней грани и минимальной температурой верхней грани.
- 2. При небольших значениях тепловой проводимости σ_0 , для которых выполняется условие $0 \le x \le 1$, температура нижней грани объекта и перепад температур между нижней и верхней гранями остаются постоянными. Это условие максимальной неизотермичности, когда величина тепловой проводимости стенок не влияет на теплообмен между стенками, который в таком случае определяется только излучением.
- 3. При $x \ge 3,5$ перепад температур между нижней и верхней гранями равен нулю. В этом случае объект является изотермическим, причем рассчитываемая с учетом внутренних переоблучений температура существенно колеблется относительно среднего значения. Поэтому при большой толщине стенки расчет требуется проводить без учета теплообмена излучением между гранями в полости куба.

Критерий неизотермичности определяется из условия

$$x = \lg(2000c\lambda) \le 1. \tag{5}$$

Отсюда вытекает требование

$$c\lambda \le 0.005 \text{ BT/K}.$$
 (6)

Из (6) следует, что при толщине стенки 0,001 м должно быть $\lambda \le 5$ Вт/(м·К). При c = 1 см требование ужесточается: $\lambda \le 0.5$ Вт/(м·К).

Критерий изотермичности определяется соотношением

$$x = \lg(2000c\lambda\Phi) \ge 3.5,\tag{7}$$

где $\gamma = 1,75$ — что следует из расчета по формуле (1).

Из (7) можно получить

$$3500 \ c\lambda \ge 10^{3.5} = 3162 \ \text{и} \ c\lambda \ge 0.9 \ \text{Вт/K},$$
 (8)

отсюда следует, что при c=1 см должно выполняться условие $\lambda \ge 90$ Bт/(м·К). При c=30 см получим $\lambda \ge 3$ Bт/(м·К).

Согласно проведенному анализу, при $\lambda = 4$ Вт/(м·К) критерию максимальной неизотермичности удовлетворяет c=1 мм, а критерию изотермичности — c=30 см. Тот и другой критерий соответствуют кубу со стороной L=1 м.

Тепловая модель полого куба с тонкими стенками. Основным принципом построения физической (тепловой) модели данного объекта является разделение его на фрагменты — на два основания и на прилегающие к основаниям четыре вертикальные стенки. Каждая из граней куба изотермична.

Задача решалась в рамках следующих допущений и ограничений:

- 1) значения толщины всех стенок постоянны по сечению, одинаковы для стенок и много меньше стороны куба;
- 2) теплообмен излучением между поверхностями во внутренней полости объекта преобладает над теплопередачей теплопроводностью по стенкам;
- 3) внутренняя полость объекта вакуумирована, поэтому отсутствует кондуктивный перенос энергии через газовую среду;
 - 4) все поверхности объекта абсолютно черные;
- 5) кондуктивный перенос тепловой энергии между основаниями и боковыми поверхностями отсутствует, что позволяет считать основания и боковые поверхности изотермическими.

Расчет температуры граней полого куба с тонкими стенками. Система уравнений энергетического баланса объекта в форме полого куба, нижнее и верхнее основания которого лежат в плоскости местного горизонта, может быть составлена по аналогии с более сложной математической моделью [14]:

$$\varphi\sigma\left(T_{1}^{4} - T_{2}^{4}\right) + 4\varphi\sigma\left(T_{1}^{4} - T_{b}^{4}\right) + (1 - \varphi_{0})\sigma T_{1}^{4} + k_{1}\varphi_{0}\sigma\left(T_{1}^{4} - T_{e}^{4}\right) = \varphi_{0}Q;$$

$$\varphi\sigma\left(T_{1}^{4} - T_{2}^{4}\right) + 4\varphi\sigma\left(T_{b}^{4} - T_{2}^{4}\right) = \sigma T_{2}^{4};$$

$$\varphi\sigma\left(T_{b}^{4} - T_{2}^{4}\right) - \varphi\sigma\left(T_{1}^{4} - T_{b}^{4}\right) + (1 - \varphi_{b})\sigma T_{b}^{4} + k_{b}\varphi_{b}\sigma\left(T_{b}^{4} - T_{e}^{4}\right) = \varphi_{b}Q;$$
(9)

где ϕ — коэффициенты облученности между внутренними поверхностями граней куба; σ — постоянная Стефана—Больцмана, $\sigma = 5,67\cdot10^{-8}$ Вт/(м²К²); T_i — температура i-й грани параллелепипеда (i=1 — нижняя грань параллелепипеда, i=2 — верхняя грань параллелепипеда, i=b — боковая грань параллелепипеда); ϕ_0 — локальный коэффициент облученности Землей нижней грани куба; ε — степень черноты поверхностей граней параллелепипеда; k_i — коэффициент, учитывающий результирующий тепловой поток от i-й грани параллелепипеда к Земле; Q — удельный тепловой поток, излучаемый Землей в космическое пространство, Q=239 Вт/м² [10—15]; T_e — эффективная температура Земли, $T_e=254,8$ К [9—15]; ϕ_b — коэффициент облученности Землей каждой боковой грани.

Коэффициент k_i принимает одно из двух значений [1—5]:

$$k_i = 1$$
 при $T_i > T_e$ и $k_i = 0$ при $T_i \le T_e$.

Дальнейшие расчеты проводились для больших высот, для которых $T_i \le T_e$ и $k_i = 0$. При выводе формул учитывалось $Q = \sigma T_e^4$.

Коэффициент облученности ϕ_0 определяется по формуле [6]

$$\varphi_0 = \left(\frac{R}{R+h}\right)^2. \tag{10}$$

где R — радиус Земли, R = 6371 км, h — высота круговой орбиты КО над поверхностью Земли. Величина φ_h описывается соотношением [5, 6]

$$\varphi_b = \frac{1}{\pi} \left(\arcsin \sqrt{\varphi_0} - \sqrt{\varphi_0} \sqrt{1 - \varphi_0} \right). \tag{11}$$

Результаты расчета температуры нижних граней куба и перепадов температур между его нижней и верхней гранями, полученные на основе решения системы уравнений (9), в сопоставлении с результатами расчетов по программе ANSYS представлены в табл. 1.

Таблица 1 Аналитическая ANSYS Высота, км Показатель модель 5000 178 175,6 Температура нижней грани, К 10000 141,6 142,9 20000 109,6 110 5000 54,8 55,5 Перепад температур между 10000 45,8 45,4 нижней и верхней гранями, К 20000 36,9 36,55

Расчет температуры изотермического объекта. Уравнение энергетического баланса изотермического куба может быть получено из системы уравнений (9). Принимая $T_1 = T_2 = T_b$ и сложив левые и правые части трех уравнений этой системы, после преобразований можно получить:

$$(6 - \varphi_0 - 4\varphi_b) \sigma T^4 = Q (\varphi_0 + 4\varphi_b). \tag{12}$$

Решение уравнения (13) имеет вид

$$T = T_e \left[(\varphi_0 + 4\varphi_b) / (6 - \varphi_0 - 4\varphi_b) \right]^{0.25}. \tag{13}$$

В табл. 2 представлены результаты расчетов коэффициентов облученности и температур по формуле (13) для куба в сопоставлении с результатами расчетов температур изотермического куба по программе ANSYS.

				Таблица 2
<i>h</i> , км	Аналитическая модель			ANSYS
	φ_0	ϕ_{b}	Т, К	<i>T</i> , K
5000	0,314	0,04	134,7	138,7
10000	0,1516	0,0132	109,7	110,9
20000	0,05873	0,003	85,2	89,5

Выводы. В результате проведенных исследований разработана и обоснована методика классификации космических объектов по признаку изотермичности. В обобщенном безразмерном виде критерии неизотермичности и изотермичности объекта описываются соотношениями (5) и (7), а для куба со стороной 1 м — формулами (6) и (8). Переход от модели тонкостенного объекта к модели изотермического монолита осуществляется подстановкой в систему уравнений (9) условия равенства температур граней, в результате получается уравнение вида (12). Уточнение требований к теплопроводности материала стенок должно проводиться с учетом реализуемых (табл. 1 и 2) температурных уровней объекта [18].

Результаты расчетов температуры по аналитическим моделям, как это видно из табл. 1 и 2, хорошо соответствуют данным, полученным по программе ANSYS. Это подтверждает достоверность методики и результатов расчетов.

Полученные данные относятся к стационарному тепловому режиму. Для тонкостенного объекта ввиду его малой термической инерционности корректно распространить выводы на случай нестационарного теплового режима. Для монолитного объекта расширение выводов на случай нестационарного режима может быть обосновано как раз высокой термической инерционностью объекта, сглаживающей температурные колебания при заходе объекта в тень Земли и при выходе из тени.

В дальнейших исследованиях особого внимания требует промежуточная ситуация, когда 1 < x < 3,5. В этом случае реализуется наиболее сложная картина формирования температурного поля, требующая разработки сложных математических моделей с учетом нестационарности тепловых процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. 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.
- 2. Дзитоев А. М., Ханков С. И. Тепловое подобие космических объектов типовых конфигураций // Научнотехнический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 2(90). С. 130—136.
- 3. 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. 179—184.
- 4. Дзитоев 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.
- 5. Дзитоев А. М., Лаповок Е. В., Ханков С. И. Тепловые режимы космических объектов / Под ред. М. М. Пенькова. СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. 172 с.
- 6. *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.
- 7. 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.
- 8. *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.
- 9. Дзитоев А. М., Лаповок Е. В., Ханков С. И. Характерные температуры и параметры Земли, формирующие ее тепловое излучение // Тр. ВКА им. А.Ф. Можайского. 2017. Вып. 656 (1). С. 137—143.
- 10. Keihl J. T., Trenberth K. E. Earth's Annual Global Mean Energy Budget // Bull. of the Amer. Met. Soc. 1997. Vol. 78, N 2. P. 197—208.
- 11. Trenberth K. E., Fasullo J. T., Keihl J. T. Earth's Global Energy Budget // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2009. Vol. 90, N 3. P. 311—323.
- 12. Palme M. D. Climate and Earth's Energy Flows // Surveys in Geophysics. 2002. Vol. 33, N 3. P. 351—357.
- 13. Trenberth K. E., Fasullo J. T., Balmaseda M. A. Earth's Energy Imbalance // J. Climate. 2014. Vol. 27. P. 3129—3144.
- 14. Дзитоев А. М., Лаповок Е. В., Ханков С. И. Методика расчета температур граней космического объекта в форме тонкостенного параллелепипеда на круговой солнечно-постоянной орбите // Тр. ВКА им. А.Ф. Можайского. 2017. Вып. 657(2). С. 118—124.

- 15. Семена Н. П. Определение ориентации космического аппарата на основе анализа поля температуры его внешней поверхности // Теплофизика и аэромеханика. 2009. Т. 16, № 1. С. 235—247.
- 16. Цаплин С. В., Болычев С. А., Романов А. Е. Основы теплообмена космических аппаратов. Самара: "Самарский университет", 2013. 287 с.
- 17. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. М.: Мир, 1975. 934 с.
- 18. Баева Ю. В., Ханков С. И. Принципы выбора материалов для криооптических систем по совокупности теплофизических свойств // Вопросы радиоэлектроники. Сер. "Техника телевидения". 2014. Вып. 2. С. 111—125.

Сведения об авторах

Азамат Миронович Дзитоев — канд. техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского; преподаватель;

E-mail: dzitoi8@gmail.com

Евгений Владимирович Лаповок — канд. техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского; ст. научный сотруд-

ник; 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;

Поступила в редакцию 09.10.18 г.

Ссылка для цитирования: Дзитоев А. М., Лаповок Е. В., Пеньков М. М., Ханков С. И. Критерии изотермичности космических объектов на примере полого куба в тени Земли // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 2. С. 156—162.

CRITERIA OF ISOTHERMALITY OF SPACE OBJECTS ON THE EXAMPLE OF A HOLLOW CUBE IN THE EARTH SHADOW

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

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

A method for determining the conditions of maximum non-isothermality and total isothermality of a space object in the form of a hollow cube in the shadow of the Earth is proposed. The object has a shell structure with a constant wall thickness, and its base lies in the plane of the local horizon. Streams of own thermal radiation of the Earth is falling on the lower base surface and the side surface of the object. All external surfaces of the object emit thermal energy into space. In the inner cavity of the object, heat is exchanged between the internal surfaces by radiation. All internal and external surfaces of the object are assumed to be completely black. The developed method is based on evaluation of the range of thermal conductivity of walls of equal thickness, for which the heat exchange between the faces of the cube is determined only by internal re-emission and does not depend on the thermal conductivity of the walls. This case corresponds to an extremely non-isothermal object. Then the average temperature of each of the surfaces of the object with a thin wall should be determined, when the effect of thermal conductivity on the alignment of temperatures on the surface of the object is negligible. Another limiting case corresponds to an isothermal object.

Keywords: thermal regime of a space object, non-isothermal space object, near-earth space, thermal radiation of the Earth, coefficients of the object irradiation by the Earth

REFERENCES

- 1. Dzitoyev A.M., Khankov S.I. JOURNAL OF OPTICAL TECHNOLOGY, 2015, no. 4(82), pp. 32-40.
- 2. Dzitoyev A.M., Khankov S.I. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2014, no. 2(90), pp. 130–136. (in Russ.)
- 3. Dzitoyev A.M., Lapovok E.V., Khankov S.I. *Journal of Instrument Engineering*, 2015, no. 12(58), pp. 179–184. (in Russ.)
- 4. Dzitoyev A.M., Lapovok E.V., Khankov S.I. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*, 2014, no. 1(642), pp. 115–124. (in Russ.)
- 5. Dzitoyev A.M., Lapovok E.V., Khankov S.I. *Teplovyye rezhimy kosmicheskikh ob"yektov* (Thermal Modes of Space Objects), St. Petersburg, 2016, 172 p. (in Russ.)
- Kamenev A.A., Lapovok E.V., Khankov S.I. Analiticheskiye metody rascheta teplovykh rezhimov i kharakteristik sobstvennogo teplovogo izlucheniya ob"yektov v okolozemnom kosmicheskom prostranstve (Analytical Methods of Calculation of the Thermal Modes and Characteristics of Own Thermal

- Radiation of Objects in Near-Earth Space), St. Petersburg, 2006, 186 p. (in Russ.)
- 7. Dzitoyev A.M., Lapovok E.V., Khankov S.I. Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2014, no. 3(91), pp. 119–125. (in Russ.)
- 8. Bayova Y., Lapovok Y., Khankov S. JOURNAL OF OPTICAL TECHNOLOGY, 2013, no. 5(80), pp. 283–288.
- 9. Dzitoyev A.M., Lapovok E.V., Khankov S.I. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*, 2017, no. 656(1), pp. 137–143. (in Russ.)
- 10. Keihl J.T., Trenberth K.E. Bull. of the Amer. Met. Soc., 1997, no. 2(78), pp. 197-208.
- 11. Trenberth K.E., Fasullo J.T., Keihl J.T. Bull. Amer. Meteor. Soc., 2009, no. 3(90), pp. 311–323.
- 12. Palme M.D. Surveys in Geophysics, 2002, no. 3(33), pp. 351-357.
- 13. Trenberth K.E., Fasullo J.T., Balmaseda M.A. J. Climate, 2014, vol. 27. pp. 3129-3144.
- 14. Dzitoyev A.M., Lapovok E.V., Khankov S.I. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*, 2017, no. 657(2), pp. 118–124. (in Russ.)
- 15. Semena N.P. THERMOPHYSICS AND AEROMECHANICS, 2009, no. 1(16), pp. 129-140.
- 16. Tsaplin S.V., Bolychev S.A., Romanov A.E. *Osnovy teploobmena kosmicheskikh apparatov* (Fundamentals of Heat Transfer of Spacecraft), Samara, 2013, 287 p. (in Russ.)
- 17. Siegel R., Howell J.R. Thermal radiation heat transfer, Hemisphere, Taylor and Francis, 1992.
- 18. Bayova Y. V., Khankov S.I. *ELECTRONICS. RADIOTECHNICS, TV technology*, 2014, no. 2, pp. 111–125. (in Russ.)

Data on authors

Azamat M. Dzitoev — PhD; Mozhaisky Military Space Academy, teacher;

E-mail: dzitoi8@gmail.com

Evgeny V. Lapovok — PhD; Mozhaisky Military Space Academy; Senior Scientist;

E-mail: leva0007@rambler.ru

Maxim M. Penkov — Dr. Sci., Professor; Mozhaysky Military Space Academy, Head of the

Academy; E-mail: vka@mil.ru

Sergey I. Khankov — Dr. Sci.; Mozhaisky Military Space Academy; Senior Scientist;

For citation: Dzitoev A. M., Lapovok E. V., Penkov M. M., Khankov S. I. Criteria of isothermality of space objects on the example of a hollow cube in the Earth shadow. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 2. P. 156—162 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-2-156-162