

УДК 520.224.2. 224.4

ТЕПЛОВОЕ ПОДОБИЕ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ТИПОВЫХ
КОНФИГУРАЦИЙА.М. Дзитоев^а, С.И. Ханков^а^а Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия, dzitoi8@gmail.com

Тепловое подобие объектов различной конфигурации определяется равенством их стационарных среднеповерхностных температур в тени Земли, что эквивалентно равенству их эффективных коэффициентов облученности собственным тепловым излучением Земли. Среди типовых конфигураций выбраны конус, цилиндр и сфера. В отличие от двух последних фигур, расчет коэффициента облученности конического объекта является наиболее сложным и содержит ряд неопределенностей. Изложена методика расчета интегральных и эффективных коэффициентов облученности космического объекта конической формы, которая типична для фрагментов космических аппаратов. Интегральные коэффициенты облученности определяют средний тепловой баланс на боковой поверхности цилиндра и конуса, а также полный энергетический баланс на поверхности сферы. Эффективные коэффициенты облученности определяют полный падающий удельный поток излучения Земли на всю поверхность цилиндрического или конического объекта с учетом их оснований. По данным об эффективных коэффициентах облученности определяются средние стационарные температуры космических объектов в тени Земли, а также и на подсвеченном Солнцем участке траектории с учетом двух дополнительных компонент энергетического баланса – прямого и отраженного Землей солнечного излучения. Исследования проводились в диапазоне изменения высоты орбиты от 200 до 40000 км в зависимости от угла наклона оси цилиндра и конуса относительно линии зенит–надир. Условия подобия цилиндра и конуса определены при равных величинах отношения высоты фигуры к диаметру основания.

Ключевые слова: космический объект конической, цилиндрической и сферической формы, эффективный коэффициент облученности космического объекта, удельный тепловой поток излучения Земли, тепловой баланс космического объекта, тепловое подобие космических объектов.

THERMAL SIMILARITY OF SPACE OBJECTS
OF STANDARD CONFIGURATIONSA.M. Dzitoev^a, S.I. Khankov^a^а Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia, dzitoi8@gmail.com

Thermal similarity of objects of various configuration is defined by equality of their stationary surface average temperatures in the Earth shadow that is equivalent to equality of their effective irradiance coefficients by own thermal radiation of the Earth. Cone, cylinder and sphere are chosen among standard configurations. Unlike two last figures, calculation of irradiance coefficient for conic object is the most difficult and contains a number of uncertainties. The method of calculation for integrated and effective irradiance coefficients of space object with a conic form is stated which is typical for fragments of spacecrafts. Integrated irradiance coefficients define the average thermal balance on a lateral surface of the cylinder and cone, and also full power balance on a sphere surface. Effective irradiance coefficients define a full falling specific stream of the Earth's radiation on the whole surface of cylindrical or conic object taking into account their bases. By data about effective irradiance coefficients, the average stationary temperatures of space objects in the Earth shadow are defined, as well as on the trajectory part illuminated by the Sun taking into account two additional components of power balance – direct sunlight and reflected by the Earth. Researches were conducted in the height change range for an orbit from 200 to 40000 km depending on a tilt angle of the cylinder and cone axis relative to zenith-nadir line. Similarity conditions for the cylinder and cone are defined at equal ratio sizes of the figure height to base diameter.

Keywords: space object of the conic, cylindrical and spherical form, effective irradiance coefficient of space object, specific thermal stream of the Earth's radiation, thermal balance of space object, thermal similarity of space objects.

Введение

Для расчетов теплового режима космического объекта (КО) при его движении по различным орбитам [1–4] необходимо определение поглощаемых поверхностью КО лучистых тепловых потоков, в том числе обусловленных собственным тепловым излучением Земли. Это требует определения интегрального коэффициента облученности (ИКО) [5–10] отдельных участков поверхностей КО земной подсветкой. Для сферического объекта коэффициент облученности описывается через ИКО достаточно просто [1, 6], что облегчает расчет средних температур сферического КО на любой орбите [6–10]. Ранее авторами было получено решение той же задачи для КО цилиндрической формы, причем для такого КО, имеющего три поверхности (боковую и две торцевых), используется эффективный коэффициент облученности (ЭКО) [5]. ИКО и ЭКО определяются через описание локального коэффициента облученности (ЛКО) для элементов боковой поверхности криволинейной формы или для всей поверхности плоских элементов. Актуальность данной задачи определяется тем, что космические аппараты содержат фрагменты различных конфигураций, в том числе конической формы.

Частью расчета ЭКО является определение ИКО характерной боковой поверхности, определяющей тип конфигурации КО (цилиндрическая, коническая). Для цилиндрического и конического КО в эффективный коэффициент облученности входят также ЛКО торцов цилиндра или основания конуса [5, 6, 9]. Тепловое подобие определяется равенством температур КО различных конфигураций в тени Земли, что эквивалентно равенству их ЭКО [6], поскольку интегральный удельный тепловой поток, падающий на всю подсвеченную Землей часть поверхности КО, равен произведению ЭКО на удельную мощность теплового излучения Земли, которая на верхней границе атмосферы равна 239 Вт/м^2 [11, 12].

Целью настоящей работы являлось исследование зависимости ИКО и ЭКО конического КО от высоты орбиты, угла наклона его оси относительно плоскости местного горизонта и половинного угла при вершине конуса, а также сопоставление ЭКО конуса, цилиндра и сферы с целью определения областей теплового подобия указанных фигур.

Модель подсветки конуса собственным тепловым излучением Земли

Для расчетов ИКО и ЭКО прямого кругового конуса тепловым излучением Земли необходимо задать все угловые координаты, определяющие ЛКО каждого элемента его поверхности. На рис. 1 представлены схемы различных вариантов ориентации конуса относительно линии зенит–надир (ZN).

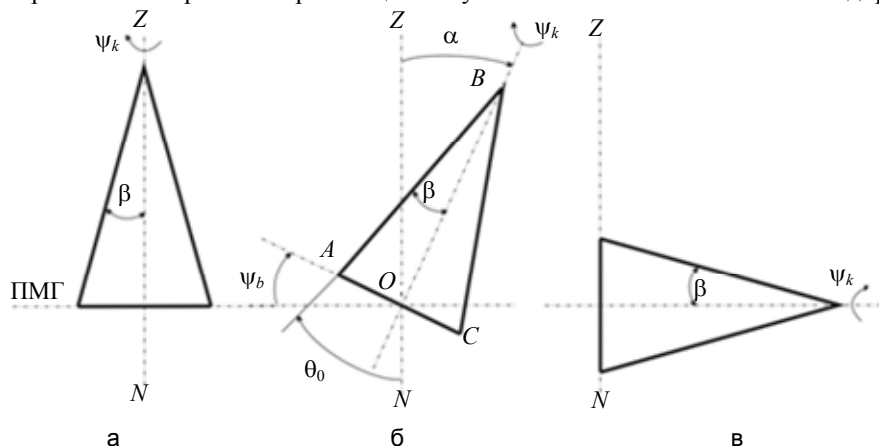


Рис. 1. Варианты ориентаций оси конуса относительно линии зенит–надир (ZN) и плоскости местного горизонта (ПМГ): а – вертикальная ориентация оси конуса при направлении вершины конуса в зенит; б – ориентация оси конуса под таким минимальным углом α , начиная с которого часть участка поверхности конуса не подсвечивается Землей; в – горизонтальная ориентация оси конуса.

ψ_k – угловая координата по конической поверхности; α – угол наклона оси конуса, отсчитываемой от направления в зенит; β – половинный угол при вершине конуса; ψ_b – угол наклона торца конуса к ПМГ; θ_0 – половинный угол, под которым из любой точки конуса видна Земля. Линия АВ на образующей конической поверхности – наиболее удаленная от Земли

Необходимо отметить, что угловая координата ψ_k отсчитывается от образующей конической поверхности, наиболее близкой к Земле. Исключение составляет вертикальное положение конуса, когда он обращен вершиной либо в зенит, либо в надир.

На рис. 1, а, представлен конический КО, вершина которого обращена в зенит, а основание – в надир и совпадает с плоскостью местного горизонта, при этом угол наклона оси конуса $\alpha = 0$. Для описания модели конуса в данной ситуации достаточно двух углов, β и ψ_k , при этом ЛКО для любой образующей конуса не зависит от ψ_k . На рис. 1, б, приведены все угловые координаты, необходимые для расчетов ИКО боковой конической поверхности и ЛКО торцевой поверхности. На этом рисунке представлена ситуация, когда угол наклона оси конуса α достиг такой величины, что наиболее удаленная от Земли образующая конической поверхности АВ уже выходит из зоны подсветки Землей. При этом выполняется условие $\theta_0 = \alpha + \beta$. ЛКО основания конуса описывается через угол ψ_b , равный углу наклона диаметральной линии основания АС к ПМГ. На рис. 1, в, приведено положение конуса, при котором его ось лежит в ПМГ, а угол наклона оси по отношению к линии ZN $\alpha = 90^\circ$. В этом положении основание конуса лежит в плоскости, перпендикулярной ПМГ и совпадающей с линией ZN, при этом $\psi_b = 90^\circ$.

Для вычислений ИКО и ЭКО конуса достаточно проводить расчеты в диапазоне изменения угла наклона оси $0 \leq \alpha \leq 180^\circ$.

Локальные коэффициенты облученности элементов конической и всей торцевой поверхности конуса

Формулы для расчета ЛКО для каждого элемента конической поверхности подсветкой Земли в общем случае можно получить на основе преобразования известных соотношений [1, 6] для элементарной площадки.

В общем случае локальный коэффициент облученности φ в зависимости от угла наклона площадки ψ может быть описан одной из трех формул:

$$\varphi = \varphi_0 x \quad \text{при } 0 \leq \psi \leq \pi/2 - \theta_0; \quad \varphi = 0 \quad \text{при } \pi/2 + \theta_0 < \psi \leq \pi, \quad (1)$$

а в промежуточном диапазоне изменения ψ – при $\pi/2 - \theta_0 < \psi \leq \pi/2 + \theta_0$ используется формула

$$\varphi = \frac{\varphi_0 x}{2} \left[1 + \frac{2}{\pi} \arcsin Y \right] + \frac{1}{\pi} \arcsin \sqrt{\frac{Z}{1-x^2}} - \frac{1}{\pi} \sqrt{(1-\varphi_0) \cdot Z}, \quad (2)$$

где Y и Z – переменные, описываемые соотношениями

$$Y = \sqrt{\frac{1}{\varphi_0} - 1} \cdot \frac{x}{\sqrt{1-x^2}}; \quad |Y| \leq 1; \quad Z = \varphi_0 - x^2; \quad Z \geq 0. \quad (3)$$

В общем случае при произвольной ориентации оси конуса относительно плоскости местного горизонта можно записать выражения для x , а также для угла наклона произвольной элементарной площадки на конической поверхности к плоскости местного горизонта ψ , для коэффициента облученности φ_0 плоской площадки, лежащей в плоскости местного горизонта, и половинного угла θ_0 , под которым из любой точки КО видна Земля, в виде

$$x = \cos\beta \cdot \sin\alpha \cdot \cos\psi_k - \sin\beta \cdot \cos\alpha; \quad \psi = \arccos x; \quad \varphi_0 = \left(\frac{R}{R+h} \right)^2; \quad \theta_0 = \arcsin \sqrt{\varphi_0}, \quad (4)$$

где β – половинный угол при вершине конуса; α – угол наклона оси конуса к линии зенит-надир; ψ_k – угловая координата в полярной системе координат, отсчитываемая по поверхности конуса, от ближней к Земле линии; $R = 6371$ км – радиус Земли; h – высота КО над поверхностью Земли.

В случае реализации условий $|Y| > 1$ или $Z < 0$ необходимо принимать в расчетах по формуле (2) $Y = \pm 1$ и $Z = 0$.

Интегральные коэффициенты облученности боковой поверхности и основания конуса для характерных ориентаций

В ряде частных случаев выражение (4) для x упрощается.

1. При $\alpha = 0$ и $\alpha = \pi$ координаты x и ψ не зависят от ψ_k , а зависят только от β , и ИКО боковой поверхности конуса совпадает с ЛКО для каждой его образующей.

1. В случае $\alpha = 0$ (вершина конуса направлена в зенит) $x = x_0 = -\sin\beta$ при $0 \leq \beta \leq \theta_0$, расчет проводится по формуле (2).
2. В случае $\alpha = \pi$ (вершина конуса направлена в надир) $x = x_\pi = \sin\beta$ при $0 \leq \beta \leq \theta_0$, расчет проводится по формуле (2), а при $\theta_0 \leq \beta \leq \pi/2$ расчет проводится по формуле, вытекающей из (1): $\varphi = \varphi_0 x_\pi = \varphi_0 \sin\beta$.

1. При $\alpha = \pi/2$ (ось конуса лежит в плоскости местного горизонта) $x = x_g = \cos\beta \cos\psi_k$ и ИКО конуса определяется интегрированием выражений для ЛКО.

1. В случае относительно малых значений половинного угла при вершине конуса β , задаваемого критерием малости $0 \leq \beta \leq \pi/2 - \theta_0$, вычисления проводятся интегрированием в трех диапазонах изменения ψ . Указанные три диапазона имеют свои пределы интегрирования, задаваемые областью значений ψ :

- для диапазона $0 \leq \psi \leq \pi/2 - \theta_0$ расчет проводится интегрированием формулы, вытекающей из (1),

$$\varphi = \varphi_0 x_g = \varphi_0 \cos\beta \cos\psi_k; \quad (5)$$
- в пределах диапазона $\pi/2 - \theta_0 \leq \psi \leq \pi/2 + \theta_0$ расчет проводится интегрированием формулы (2);
- для диапазона $\pi/2 + \theta_0 < \psi \leq \pi$ $\varphi = 0$.

Два интеграла, определенные по формулам (2) и (5), суммируются и делятся на π .

2. В случае $\pi/2 - \theta_0 \leq \beta \leq \pi/2$ расчет проводится интегрированием формулы (2) по координате ψ в пределах ее изменения $0 \leq \psi \leq 2\pi$, полученное значение делится на 2π .

В случае вертикальной ориентации оси конуса ($\alpha = 0$ и $\alpha = \pi$) и при $\beta = 0$ конус вырождается в цилиндр, и значения ИКО боковой поверхности φ_n в точности равны коэффициенту облученности боковой поверхности цилиндра (его ЛКО), ось которого совпадает с направлением зенит-надир. В этом случае коэффициент облученности описывается соотношением [6]

$$\varphi_n = \frac{1}{\pi} \left(\arcsin \sqrt{\varphi_0} - \sqrt{\varphi_0} \cdot \sqrt{1-\varphi_0} \right). \quad (6)$$

Если вершина конуса направлена в нади́р и $\beta = \pi/2$, значения φ_n точно совпадают с величинами коэффициентов облученности плоской площадки, лежащей в плоскости местного горизонта φ_0 , определяемыми формулой (4). При ориентации вершины конуса в зенит ЛКО его торца описывается формулой для φ_0 из (4).

При горизонтальной ориентации оси конуса ($\alpha = \pi/2$) формулой (6) описывается ЛКО его торца.

Методики расчета ИКО и ЭКО в зависимости от ориентации оси конуса

В расчетах ИКО использовался подход, описанный для цилиндра в [5], с тем отличием, что пределы интегрирования выбирались с учетом угла наклона ближайшей к Земле образующей конуса, отличающегося от угла наклона оси конуса на угол β . Это приводит к необходимости при расчетах зависимостей $\varphi_{int}(\alpha)$ ввести рассматриваемые диапазоны и пределы интегрирования с учетом поправки на половинный угол при вершине конуса. При расчете ИКО конической поверхности в пределах изменения угла наклона оси конуса $0 \leq \alpha \leq \theta_0 + \beta$ проводится интегрирование формулы (2) в пределах от нуля до 2π , и интеграл делится на 2π . При $\theta_0 + \beta < \alpha < \pi - \theta_0 - \beta$ проводится интегрирование локальных коэффициентов облученности φ_1 и φ_2 из (1) и (2) в указанных пределах, и сумма интегралов делится на π . Для третьего участка изменения угла наклона оси конуса $\pi - \theta_0 - \beta \leq \alpha \leq \pi$ осуществляется интегрирование формулы (2) в пределах от нуля до 2π , и полученный интеграл делится на 2π .

Для конуса ЭКО в случае равенства степеней черноты боковой поверхности и основания может быть определен из соотношения [6]

$$\varphi_k = \frac{\varphi_b \sin \beta + \varphi_{int}}{\sin \beta + 1}. \quad (7)$$

Каждый из коэффициентов облученности φ_b и φ_{int} зависит от высоты конического объекта над поверхностью Земли h и от угла наклона оси конуса относительно линии зенит–нади́р α , а от половинного угла при вершине конуса β зависит только φ_{int} .

Результаты расчетов ИКО и ЭКО конуса

На основе описанной методики расчетов φ_{int} , а также φ_b , определяемого из формул (1) или (2) как для локального коэффициента облученности (выбор формулы определяется с учетом величины угла наклона торца к плоскости местного горизонта), были получены зависимости ИКО от угла наклона оси конуса α для различных значений β и высоты конуса над поверхностью Земли h .

Исследования зависимостей ИКО φ_{int} от α проводились для диапазона изменения параметров $200 \leq h \leq 40000$ км, $0^\circ < \beta \leq 45^\circ$. На рис. 2 представлены зависимости ИКО боковой поверхности конуса от угла наклона его оси для разных значений h и β . При значениях угла наклона $\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = 180^\circ$ реализуются предельные переходы к описанным выше частным случаям.

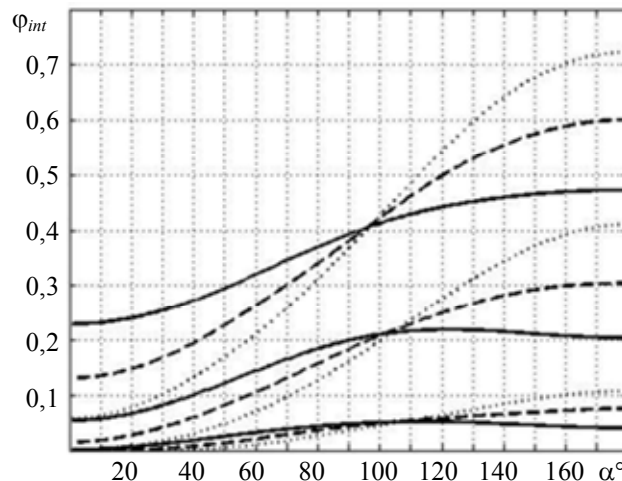


Рис. 2. Зависимости ИКО конической поверхности от угла наклона оси конуса при $\beta = 15^\circ$ (сплошные линии), $\beta = 30^\circ$ (штриховые линии) и $\beta = 45^\circ$ (пунктирные линии).

Группы линий сверху вниз соответствуют высоте КО над поверхностью Земли 200, 2000 и 10000 км

Из рис. 2 можно сделать вывод о том, что с ростом угла β разрыв величины φ_{int} между точками $\alpha = 180^\circ$ и $\alpha = 0^\circ$ увеличивается. В области изменения величины α от 95° до 110° линии на каждой высоте пересекаются, т.е. величина ИКО не зависит от угла конусности β . Если при относительно малых углах β при больших высотах зависимости $\varphi_{int}(\alpha)$ имеют максимумы вблизи точек пересечения всех линий, то

при возрастании угла β зависимости приобретают все более выраженный монотонный характер. При угле β , стремящемся к нулю, значения ИКО конуса приближаются к значениям ИКО цилиндра.

При исследовании ЭКО установлено, что все зависимости $\varphi_k(\alpha)$ симметричны относительно значения $\varphi_k(\alpha = 90^\circ)$, при этом $\varphi_k(\alpha = 0^\circ) = \varphi_k(\alpha = 180^\circ)$. На рис. 3 представлены зависимости $\varphi_k(\alpha)$ для высоты конического КО над поверхностью Земли $h = 600$ км при различных значениях угла конусности β .

Характер зависимостей ЭКО от угла наклона оси α воспроизводится для различных высот. Различия заключаются в количественных значениях φ_k , падающих с ростом высоты.

Из данных рис. 3 можно сделать следующие выводы:

- в области значений $\alpha = 57^\circ$ и $\alpha = 123^\circ$, что примерно соответствует $\alpha = 1$ рад и $\alpha = (\pi - 1)$ рад, наблюдаются пересечения всех линий (своеобразные узлы);
- в указанных узлах реализуется тепловое подобие конических объектов с любым значением β ;
- значение φ_k в узловых точках очень близко к ИКО сферического КО при той же высоте;
- в точке $\alpha = 90^\circ$ имеют место экстремумы зависимости (максимумы при малых значениях β и минимумы при больших);
- при $\beta < 15^\circ$ максимальные значения ЭКО реализуются в точках $\alpha = 90^\circ$, а при больших значениях β наибольшие значения φ_k имеют место при вертикальной ориентации оси конуса – в точках $\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = 180^\circ$.

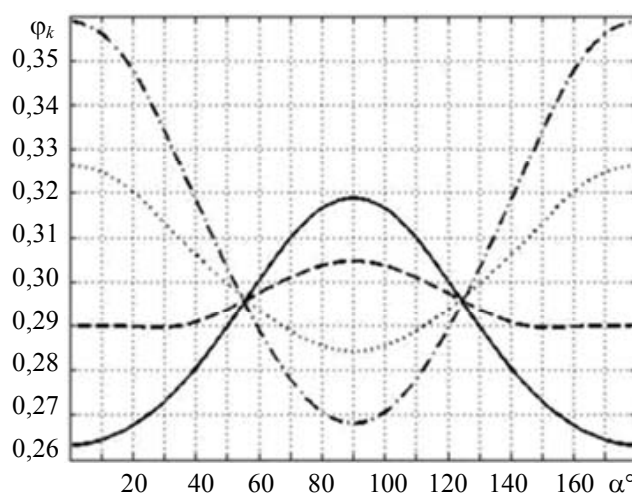


Рис. 3. Зависимости ЭКО конической поверхности при высоте над поверхностью Земли $h = 600$ км от угла наклона оси конуса при $\beta = 5^\circ$ (сплошная линия), $\beta = 15^\circ$ (штриховая линия), $\beta = 30^\circ$ (пунктирная линия) и $\beta = 45^\circ$ (штрих-пунктирная линия)

Тепловое подобие КО различных конфигураций

Тепловое подобие КО различных конфигураций определяется совпадением или весьма малым различием значений ЭКО, когда стационарные температуры таких КО в тени Земли равны.

На рис. 4 представлены зависимости ЭКО конуса и цилиндра от угла наклона их осей, а также ИКО сферы для малых величин угла конусности β . Расчеты проводились для случая, когда конус вписан в цилиндр, т.е. когда отношения высот обеих фигур к диаметру основания равны, что описывается соотношением

$$n = 0,5 \operatorname{ctg} \beta. \quad (8)$$

По данным расчетных исследований, частный результат которых представлен на рис. 4, можно сделать выводы, которые действительны и для других высот:

- при $\beta \leq 11^\circ$ ЭКО конуса с высокой точностью (погрешность менее 3%) совпадают с ЭКО цилиндра при условии, описываемом соотношением (8);
- в диапазоне изменения углов $18^\circ \leq \beta \leq 21^\circ$ зависимость $\varphi_k(\alpha)$ имеет пять экстремальных значений (при α , равном 0° , 40° , 90° , 140° и 180°), при этом колебания значений φ_k в диапазоне изменения α от 0° до 180° происходят относительно линии 4, соответствующей постоянному значению ИКО сферы;
- в результате можно сделать вывод о тепловом подобии конического и цилиндрического КО при $\beta \leq 11^\circ$ (что соответствует диапазону изменения n , примерно равному $2,8 \leq n < \infty$), а также о тепловом подобии конического и сферического КО при $18^\circ \leq \beta \leq 21^\circ$;
- в узловых точках $\alpha = 57^\circ$ и $\alpha = 123^\circ$ при всех высотах и углах при вершине конуса реализуется тепловое подобие конуса, цилиндра и сферы.

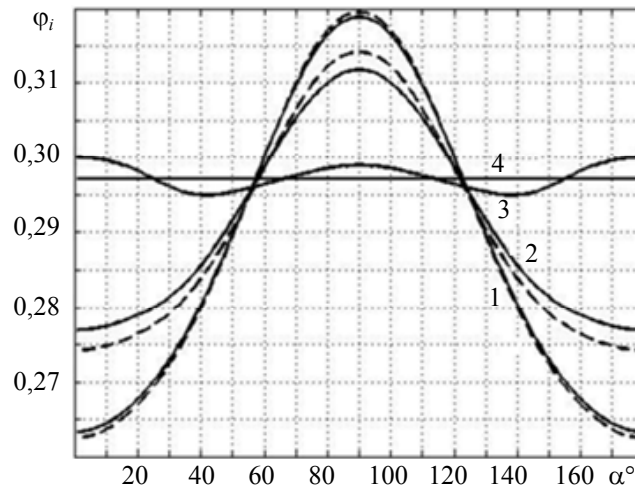


Рис. 4. Зависимости от угла наклона осей ЭКО конического (сплошные линии) и цилиндрического КО (штриховые линии), а также ИКО сферического КО (линия 4) при высоте орбиты 600 км. Линии соответствуют: 1 – $\beta = 5^\circ$; 2 – $\beta = 10^\circ$; 3 – $\beta = 19^\circ$; 4 – ИКО сферы

Подобие ЭКО конического КО сферическому создает большие удобства, поскольку ИКО сферы вычисляется по простой формуле [6]:

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

Отмеченное тепловое подобие выполняется в указанных диапазонах с высокой точностью, это подобие сохраняется при увеличении высот КО над поверхностью Земли и свыше 2000 км, однако погрешность замены конуса цилиндром или сферой возрастает, а диапазоны изменения углов β , в пределах которых реализуется подобие, сужаются.

Обсуждение результатов

Расчет ИКО конического КО базируется на использовании формул для ЛКО элементарной площадки для каждого участка боковой поверхности конуса (1)–(4), те же формулы используются для расчета ЛКО основания. В первом случае проводится интегрирование по угловой координате уравнений (1) и (2) в пределах, отличающихся от пределов, используемых при расчетах цилиндра. Затем определяется ЭКО конуса по формуле (7). Очень важно следить за выполнением условий (3), поскольку в некоторых случаях эти условия нарушаются, что приводит к разрывам зависимостей ИКО и ЭКО от угла ориентации оси α . Во избежание этой ситуации достаточно использовать в расчетах предельные значения $Y = \pm 1$ и $Z = 0$.

На основе проведенных исследований установлено, что при равенстве отношения высоты к диаметру конуса и цилиндра (модель вписанного в цилиндр конуса) в пределах изменения половинного угла при вершине конуса $0 < \beta \leq 11^\circ$ и высот $200 < h < 2000$ км реализуется тепловое подобие конуса и цилиндра с погрешностью, не превышающей 3%. При изменении половинного угла при вершине конуса в пределах $18^\circ \leq \beta \leq 21^\circ$ на тех же высотах имеет место тепловое подобие конуса и сферы с той же погрешностью. При углах наклона оси конуса и цилиндра к линии зенит–надир примерно $\alpha = 57^\circ$ и $\alpha = 123^\circ$ цилиндр, конус и сфера с большой точностью подобны друг другу в тепловом отношении.

Заключение

Полученные результаты позволяют для ряда характерных случаев существенно упростить расчет эффективного коэффициента облученности конуса, заменяя его расчетом цилиндра, для которого ранее были получены простые в использовании аппроксимационные зависимости [5], а также расчетом интегрального коэффициента облученности сферы, определяемого по весьма простой формуле.

Проведенные исследования также позволили выявить ограничения, которые необходимо накладывать на параметры исходных расчетных формул, а также определить характерные особенности, отличающие пределы интегрирования соотношений для локального коэффициента облученности конуса от пределов интегрирования, принимаемых для расчетов цилиндра.

В отличие от цилиндрического космического объекта, для космического объекта конической формы весьма сложно подобрать достаточно простые и наглядные аппроксимационные зависимости эффективного коэффициента облученности от исходных параметров, которые позволили бы упростить расчеты. В определенной степени это объясняется введением дополнительного параметра – половинного угла при вершине конуса.

Reference

1. *Modelirovanie teplovykh rezhimov kosmicheskogo apparata i okruzhayushchei ego sredy* [Modeling of the thermal regimes of the spacecraft and its environment]. Ed. G.P. Petrov. Moscow, Mashinostroenie Publ, 1971, 382 p.
2. Duboshin G.N. *Nebesnaya mekhanika. Osnovnye zadachi i metody* [Celestial mechanics. The main tasks and methods]. Moscow, Nauka Publ., 1968, 800 p.
3. Chebotarev G.A. *Analiticheskie i chislennye metody nebesnoi mekhaniki* [Analytical and numerical methods of celestial mechanics]. Moscow–Leningrad, Nauka Publ., 1965, 367 p.
4. Smart W.M. *Celestial Mechanics*. NY, John Wiley, 1961, 381 p. (Russ. ed.: Smart U.M. *Nebesnaya mekhanika*. Moscow, Mir Publ., 1965, 502 p.)
5. Dzitoev A.M., Hankov S.I. Metodika rascheta koeffitsientov obluchennosti tsilindricheskogo kosmicheskogo ob'ekta podsvetkoi Zemli [Calculation methods for irradiance coefficients of cylindrical space object by the Earth radiation]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2014, no. 1 (89), pp. 145–150.
6. Kamenev A.A., Lapovok Ye.V., Khankov S.I. *Analiticheskie metody rascheta teplovykh rezhimov i kharakteristik sobstvennogo teplovogo izlucheniya ob'ektov v okolozemnom kosmicheskome prostranstve* [Analytical methods for calculating the thermal conditions and the characteristics of the intrinsic thermal radiation of objects in near-Earth space]. St. Petersburg, L.T. Tushkov Scientific Technical Center, 2006, 186 p.
7. Bayova Yu.V., Lapovok Ye.V., Hankov S.I. Metodika rascheta nestatsionarnykh temperatur kosmicheskogo ob'ekta na krugovykh orbitakh [A method for calculation of non-stationary temperature of space object on a circular orbit]. *Izv. vuzov. Priborostroenie*, 2013, vol. 56, no. №12, pp. 51–56.
8. Bayova Yu.V., Lapovok Ye.V., Hankov S.I. Metodika rascheta nestatsionarnykh temperatur kosmicheskogo ob'ekta, dvizhushchegosya po ellipticheskoi orbite [Calculation method of the transient temperatures for moving space object on the elliptical orbit]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2013, no. 6 (88), pp. 67–72.
9. Bayova Yu.V., Lapovok Ye.V., Hankov S.I. Analytical technique for calculating the heat flexes in near-Earth space that form the thermal regime of space telescopes. *Journal of Optical Technology*, 2013, vol. 80, no 5, pp. 283–288. doi: 10.1364/JOT.80.000283
10. Bayova Yu.V., Lapovok Ye.V., Khankov S.I. Metod podderzhaniya zadannogo temperaturnogo diapazona kosmicheskogo apparata, dvizhushchegosya po krugovoi orbite s zakhodom v ten' Zemli [Method of maintaining the specified temperature range of the spacecraft moving in a circular orbit with entering the Earth's shadow]. *Izv. vuzov. Priborostroenie*, 2013, vol. 56, no. 7, pp. 56–61.
11. Keihl J.T., Trenberth K.E. Earth's annual global mean energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, vol. 78, no. 2, pp. 197–208.
12. Trenberth K.E., Fasullo J.T., Keihl J. Earth's global energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, vol. 90, no. 3, pp. 311–323.

- Дзитоев Азамат Миронович** – адъюнкт, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия, dzitoi8@gmail.com
- 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
- Sergey I. Khankov** – D.Sc., chief staff scientist, Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia, Leva0007@rambler.ru

Принято к печати 10.02.14
Accepted 10.02.14