

УДК 520.224.2. 224.4

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТОВ ОБЛУЧЕННОСТИ
ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА ПОДСВЕТКОЙ ЗЕМЛИ**А.М. Дзитолев^а, С.И. Ханков^а^а Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия, Dzitoi8@gmail.com

Разработана приближенная методика расчета эффективных коэффициентов облученности космического объекта цилиндрической формы, которая типична для наружных корпусов космических телескопов, а также фрагментов космических аппаратов. В настоящее время отсутствуют аналитические методики расчета интегральных и эффективных коэффициентов облученности для такой конфигурации космических объектов. Интегральные коэффициенты облученности определяют средний тепловой баланс на цилиндрической поверхности, а эффективные – на всей поверхности цилиндра с учетом его торцов. Расчеты эффективных коэффициентов облученности космических объектов подсветкой Земли необходимы для определения важнейшей компоненты энергетического баланса – удельной мощности собственного теплового излучения Земли. Такие расчеты используются для определения средних температур космических объектов. Методика основана на обобщении и аппроксимации результатов численных расчетов в диапазоне изменения высоты орбиты от 200 км до 40000 км, а также во всем возможном диапазоне изменения угла наклона оси цилиндра. Показаны неопределенности в математической модели при небольших отклонениях положения оси цилиндра от линии зенит–надир. Исследованы погрешности приближенного решения при определении интегрального коэффициента облученности боковой цилиндрической поверхности. Допустимая итоговая погрешность полученного приближенного решения оценивалась по отклонению температуры объекта в тени Земли от ее точного значения. При больших отношениях высоты цилиндра к диаметру погрешности расчета интегрального коэффициента облученности максимальны и могут приводить к погрешности определения температур в тени Земли до 1,5 К. Погрешности расчета температуры цилиндра уменьшаются с уменьшением отношения его высоты к диаметру. Они минимальны для модели тонкого диска. Погрешности расчета температур значительно снижаются для случая нахождения цилиндрического объекта на подсвеченном Солнцем участке траектории, а еще более – при расчетах нестационарного теплового режима. Предложенная методика расчета достаточно точна, проста и удобна для расчетов.

Ключевые слова: космический объект цилиндрической формы, коэффициент облученности космического объекта, удельный тепловой поток излучения Земли, тепловой баланс космического объекта.

**CALCULATION METHODS FOR IRRADIANCE COEFFICIENTS
OF CYLINDRICAL SPACE OBJECT BY THE EARTH RADIATION**А. Dzitoev^б, S. Khankov^б^б Military Space Academy n.a. A.F. Mozhaisky, Saint Petersburg, Russia, Dzitoi8@gmail.com

The paper deals with approximate calculation methods for effective irradiance coefficients of cylindrical form space object typical for external cases of space telescopes and fragments of spacecrafts as well. There are no analytical calculation methods nowadays for integrated and effective irradiance coefficients for space objects of such configuration. Integrated irradiance coefficients define the average thermal balance on a cylindrical surface and effective ones – all over the cylinder surface taking into account its butt ends. Calculations of effective coefficients for space objects irradiance by the Earth radiation are necessary for definition of the major component of power balance – the specific power of the Earth inherent thermal radiation. Such calculations are used for determination of average temperatures of space objects. The technique is based on generalization and approximation of results for numerical calculations in the range of orbit height change from 200 km to 40000 km and also in all possible range of a tilt angle change of a cylinder axis. Uncertainties in mathematical model at small location deviations for cylinder axis from zenith-nadir line are shown. Errors of the approximate solution are analyzed during determination of integrated irradiance coefficient for a lateral cylindrical surface. The admissible total error of the received approximate solution was estimated at a temperature deviation of an object in the Earth shadow from its exact value. At the large ratios of the cylinder height to its diameter calculation, errors of integrated irradiance coefficient are maximum and can cause temperature error definitions in the Earth shadow up to 1,5 K. Errors of cylinder temperature calculation decrease with reduction of its height-to-diameter ratio. They have minimum values for a thin disk model. Temperatures calculation errors are considerably decreased for a case of cylindrical object location on the trajectory section illuminated by the Sun, and even more – at calculations of a non-stationary thermal mode. The offered calculation technique is rather accurate, simple and convenient for calculations.

Keywords: cylindrical form space object, irradiance coefficient of space object, specific thermal radiation flux of the Earth, space object thermal balance.

Введение

При расчетах нестационарных тепловых режимов космических объектов (КО) необходимо определение величин падающих и поглощаемых поверхностью КО тепловых потоков от прямого и отраженного Землей солнечного излучения, а также собственного теплового излучения Земли [1–4]. Первые две ком-

поненты теплового баланса КО вычисляются следующим образом. Прямая солнечная засветка поверхности КО определяется через солнечную постоянную с учетом площади его миделя и коэффициента поглощения солнечного излучения [1]. Эта компонента теплового баланса вычисляется без особых затруднений. Вторая компонента вычисляется через так называемый комбинированный коэффициент облученности, расчет которого связан с большими затруднениями [1] и, как правило, осуществляется численными методами. Третья компонента теплового баланса определяется через величину удельного теплового потока в полном спектре собственного теплового излучения Земли, а также через коэффициент облученности, который представляет собой отношение падающего на поверхность КО удельного теплового потока к тепловому потоку, излучаемому Землей с верхней границы атмосферы. В этом потоке учитывается тепловое излучение атмосферы и излучение подстилающей земной поверхности, проходящее через окна прозрачности атмосферы в спектре инфракрасного теплового излучения [1].

Известно, что спектр собственного теплового излучения Земли с учетом атмосферы имеет ярко выраженный селективный характер. Однако на практике принято пользоваться для расчетов теплового баланса интегральными удельными тепловыми потоками [1]. По этой причине значительные средства затрачиваются на экспериментальные определения глобальной (усредненной по всей поверхности Земли) величины излучаемой Землей в космическое пространство удельной мощности [5, 6]. Такие экспериментальные исследования, проводимые с космических аппаратов (КА), позволили уточнить эту величину с 235 Вт/м² [5] до 239 Вт/м² [6].

Для расчетов тепловых потоков, поглощаемых КО, необходимо определение интегрального коэффициента облученности (ИКО) [7–12] КО земной подсветкой в зависимости от его конфигурации. ИКО определяет удельный тепловой поток, который усредняется по всей поверхности КО и вычисляется интегрированием локальных коэффициентов облученности для каждого элемента поверхности. Для сферического объекта коэффициент облученности описывается просто [1, 12], что облегчает расчет нестационарных температур сферического КО на любой орбите [12–15]. Большой практический интерес представляет решение той же задачи для КО цилиндрической формы, которую имеют многие реальные объекты, в том числе корпуса телескопов, базируемых на борту КА [16]. Сами КА также содержат фрагменты цилиндрической формы. Это определяет актуальность данной задачи.

Для объектов с конфигурацией, составленной из разного рода поверхностей (параллелепипед, цилиндр, конус) используется эффективный коэффициент облученности (ЭКО), который описывает удельный тепловой поток, поглощенный всей поверхностью КО. Частью расчета ЭКО является определение ИКО цилиндрической боковой поверхности. Для цилиндрического КО (ЦКО) в эффективный коэффициент облученности входят также коэффициенты облученности Землей торцов цилиндра [14, 15].

Целью настоящей работы являлось получение приближенного аналитического описания зависимости эффективного коэффициента облученности ЦКО от высоты орбиты, угла наклона его оси относительно плоскости местного горизонта и отношения высоты цилиндра к его диаметру.

Разрабатываемая методика должна основываться на аналитических формулах, составляющих алгоритм расчетов, исключающий необходимость проведения интегрирования громоздких выражений для локального коэффициента облученности.

Физическая и математическая модели процесса подсветки цилиндра собственным тепловым излучением Земли

Стационарная температура T КО произвольной выпуклой формы в тени Земли может быть описана формулой [10–14]

$$T = T_e \sqrt[4]{\frac{\varphi_e}{1 - \varphi_e}}; \quad T_e = \sqrt[4]{\frac{Q}{\sigma}}, \quad (1)$$

где $T_e = 255$ К – эффективная температура Земли [15, 16]; φ_e – ЭКО объекта; $Q = 239$ Вт/м² – удельная мощность собственного теплового излучения Земли [15, 16]; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана–Больцмана.

Для ЦКО ЭКО определяется на основании данных [12, 13] в виде

$$\varphi_c = \frac{\varphi_b + 2n\varphi_{int}}{1 + 2n}; \quad n = \frac{L}{d}, \quad (2)$$

где φ_b – коэффициент облученности торцевой поверхности цилиндра (в расчетных формулах учитывается наличие двух торцов); φ_{int} – интегральный коэффициент облученности боковой поверхности цилиндра; L – высота цилиндра; d – диаметр его основания; φ_c – эффективный коэффициент облученности.

На рис. 1 представлены варианты ориентации оси цилиндра относительно линии зенит–надир; α – угол наклона оси ЦКО относительно этой вертикальной линии.

При вертикальной ориентации цилиндра, т.е. при $\alpha = 0$ (рис. 1, а), верхний торец цилиндра не подсвечен Землей, коэффициент облученности нижнего торца вычисляется как для площадки, лежащей в плоскости местного горизонта [1, 10]

$$\varphi_0 = (1 + a)^{-2}; \quad a = \frac{h}{R}, \quad (3)$$

где h – высота площадки над поверхностью Земли; $R = 6371$ км – радиус Земли.

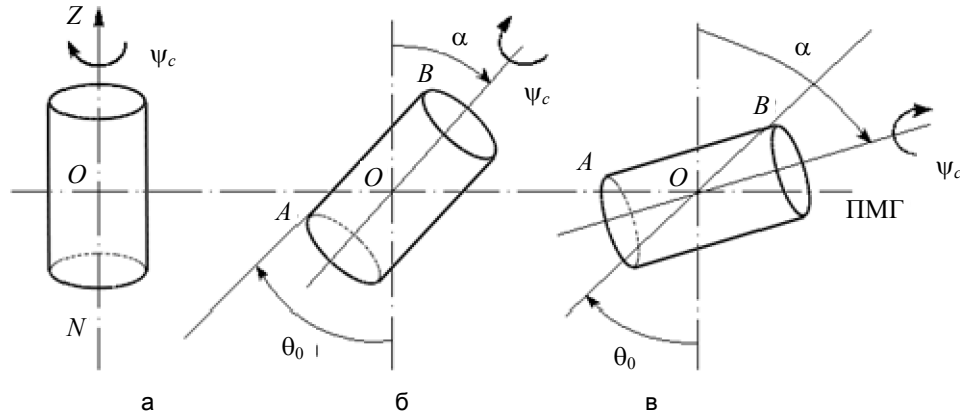


Рис. 1. Варианты ориентаций оси цилиндра относительно линии зенит–надир (ZN) и плоскости местного горизонта (ПМГ): а – вертикальная ориентация оси цилиндра; б – ориентация оси цилиндра под углом α , равным углу θ_0 ; в – ориентация оси цилиндра под углом α , большим угла θ_0 и меньшим 90° . Углы соответствуют: ψ_c – угловая координата по цилиндрической поверхности; α – угол наклона оси цилиндра, отсчитываемой от оси ZN; θ_0 – половинный угол, под которым из любой точки цилиндра видна Земля. Линия AB на образующей цилиндрической поверхности – наиболее удаленная от Земли

Для боковой поверхности цилиндра в этом случае расчет проводится как для вертикально ориентированной площадки по формуле [1, 10]

$$\varphi_{bc} = \frac{1}{\pi} \left(\arcsin \sqrt{\varphi_0} - \sqrt{\varphi_0} \cdot \sqrt{1 - \varphi_0} \right), \quad (4)$$

где φ_{bc} – коэффициент облученности вертикальной площадки, одновременно локальный и интегральный; индексы b и c относятся к боковой поверхности цилиндра.

Для горизонтально ориентированного цилиндра также имеются расчетные формулы для определения ЭКО [15, 16]. Для промежуточных ориентаций оси $0 < \alpha < \pi/2$ (рис. 1, б, в) расчеты существенно усложняются. При наклоне оси цилиндра относительно оси ZN на угол α (рис. 1) угол наклона ψ элемента поверхности цилиндра, задаваемого угловой координатой на цилиндрической поверхности ψ_c , отсчитываемой от образующей, наиболее близкой к Земле, может быть определен с использованием данных [1, 2] с помощью соотношения

$$\psi = \arccos x; \quad x = \sin \alpha \cdot \cos \psi_c. \quad (5)$$

Важным параметром, определяющим характеристики облученности элемента поверхности КО любой формы, является половинный угол θ_0 , под которым с этого элемента поверхности видна Земля, описываемый формулой [1, 12]

$$\theta_0 = \arcsin(\sqrt{\varphi_0}).$$

Зависимость локального коэффициента облученности плоского элемента поверхности собственным тепловым излучением Земли от угла наклона касательной к этому элементу, а также от высоты этого элемента над поверхностью Земли описывается известными соотношениями [1, 12], которые в наиболее компактной форме могут быть выражены через x в формуле (5). При этом в зависимости от величины угла наклона ψ коэффициент облученности описывается одной из трех формул:

$$\varphi_1 = \varphi_0 \cdot x \text{ при } 0 \leq \psi \leq \frac{\pi}{2} - \theta_0; \quad \varphi_3 = 0 \text{ при } \frac{\pi}{2} + \theta_0 \leq \psi \leq \pi; \quad (6)$$

$$\varphi_2 = \frac{\varphi_1}{2} \left[1 + \frac{2}{\pi} \arcsin \left(\sqrt{\frac{1}{\varphi_0} - 1} \cdot \frac{x}{\sqrt{1 - x^2}} \right) \right] + \frac{1}{\pi} \arcsin \sqrt{\frac{\varphi_0 - x^2}{1 - x^2}} - \frac{1}{\pi} \sqrt{(1 - \varphi_0) \cdot (\varphi_0 - x^2)}. \quad (7)$$

Формула (7) используется при $\frac{\pi}{2} - \theta_0 \leq \psi \leq \frac{\pi}{2} + \theta_0$.

ИКО цилиндра определяется путем интегрирования (6) и (7) в указанных при этих формулах пределах. Затем полученные интегралы суммируются и делятся на π .

Для расчетов ЭКО ЦКО по формуле (2) необходимо определить φ_b и φ_{int} .

При определении коэффициентов облученности торцов ЦКО введены обозначения: верхний торец, наиболее удаленный от поверхности Земли, характеризуется коэффициентом облученности φ_{bu} , нижний торец, ближний к поверхности Земли, – коэффициентом облученности φ_{bl} . Тогда в (2) вместо φ_b подставляется

$$\varphi_b = 0,5(\varphi_{bu} + \varphi_{bl}). \quad (8)$$

Для расчета коэффициентов облученности торцов ЦКО в формулы (6) и (7) подставляется значение $x = \cos \psi$. Зависимость угловой координаты ψ от угла наклона оси ЦКО относительно плоскости местного горизонта для нижнего и верхнего торцов определяются соотношениями $\psi_l = \alpha$; $\psi_u = \pi - \alpha$. Использование формулы (8) обеспечивает предельные переходы и непрерывность ЭКО во всем диапазоне изменения угла наклона оси цилиндра α .

Методика расчета интегрального коэффициента облученности боковой поверхности цилиндра

При расчете ИКО ЦКО в пределах изменения угла наклона оси цилиндра $0 < \alpha < \theta_0$ возникает принципиальная неопределенность в математической модели. При $\alpha = 0$ (рис. 1, а) расчет φ_{int} в формуле (2) заменяется расчетом коэффициента облученности по формуле (4) – вариант модели 1 (ВМ 1). Эта модель предполагает использование локальных коэффициентов облученности φ_1 и φ_2 из (7) при малых величинах x . Однако границы допустимых значений α и соответственно x неопределенны. При значительных величинах угла наклона оси, вплоть до $\alpha = \theta_0$, ВМ 1 неприменима. В то же время до $\alpha \leq \theta_0$ неправомерно использование уравнений (6) и (7) для определения ИКО на основе интегрирования φ_1 и φ_2 . Для $\alpha > \theta_0$ (рис. 1, в) ИКО определяется интегрированием по участкам координат φ_1 и φ_2 – вариант модели 2 (ВМ 2).

Проведенные расчетные исследования подтвердили указанную неопределенность в выборе математической модели на участке $0 < \alpha < \theta_0$. При использовании ВМ 1 и ВМ 2 вычисленные значения коэффициентов облученности боковой поверхности ЦКО на одних и тех же диапазонах изменения α недостаточно точно стыкуются друг с другом. Это обосновывает необходимость получения хотя бы приближенного единого описания ИКО во всем диапазоне изменения угла наклона $0 \leq \alpha \leq \pi$ на основе получения аппроксимационных функций с определением погрешности получаемого конечного решения.

Зависимость коэффициента облученности φ_a боковой поверхности цилиндра от высоты и угла наклона оси аппроксимировалась формулами

$$\varphi_a = \varphi_b [1 - f(\alpha)] + \varphi_m \cdot f(\alpha); \quad \varphi_b = \varphi(\alpha = 0); \quad \varphi_m = \varphi(\alpha = \pi/2), \quad (9)$$

где φ_b и φ_m – функции только высоты; $f(\alpha)$ – функция только угла наклона оси ЦКО.

Зависимость $f(\alpha)$ была аппроксимирована функцией вида

$$f(\alpha) = a_1 \cdot \sin(b_1 \cdot \alpha + c_1) + a_2 \cdot \sin(b_2 \cdot \alpha - c_2), \quad (10)$$

которая изменяется от нуля при $\alpha = 0$ до единицы при $\alpha = \pi/2$.

Зависимости $\varphi_m(h)$ аппроксимирована формулой

$$\varphi_m = a_3 \exp(-b_3 H) + a_4 \exp(-b_4 H); \quad H = \frac{h}{1000}. \quad (11)$$

Величина H соответствует высоте траектории, исчисляемой в тысячах километров.

Для обеспечения минимальных погрешностей аппроксимационных зависимостей (9)–(11) относительно исходных расчетных зависимостей ИКО, определяемых по формулам (4), (6) и (7), коэффициенты в аппроксимационных формулах определялись для пяти интервалов высот H . Значения коэффициентов аппроксимации представлены в таблице.

Погрешность аппроксимации в максимуме зависимости, при $\alpha = \pi/2$, не превышает 1%. В то же время максимальная погрешность, реализуемая в области $20^\circ < \alpha < 60^\circ$, достигает 2,3%, 4%, 4,5%, –5,7%, –4,7% при H равном 0,2–2, 2–5, 5–10, 10–20, 20–40 соответственно. Для вытянутого цилиндрического стержня ($n > 10$) из (2) следует: $\varphi_c \approx \varphi_{int}$, поэтому для расчетов температур по формуле (1) достаточно использования ИКО. Погрешности определения стационарных температур ЦКО в тени Земли составляют для указанных диапазонов 1,2 К, 1,5 К, 1,4 К, –1,2 К и –0,8 К, что вполне удовлетворительно для практических расчетов. На подсвеченном Солнцем участке траектории погрешности расчетов температур будут еще меньше, а при расчетах нестационарных температур при движении ЦКО по траектории с попеременной сменой солнечных и теневых участков погрешности расчетов температур будут дополнительно сглаживаться за счет термической инерции ЦКО при его достаточно большой полной теплоемкости.

На рис. 2 представлены типовые зависимости φ_{int} и φ_c от угла наклона оси цилиндра α для разных высот ЦКО над поверхностью Земли в наиболее важном диапазоне изменения h . На рис. 2 представлены

вычисленные по разработанным формулам зависимости от угла наклона оси цилиндра для высот от 200 км до 2000 км. Сплошными линиями указаны зависимости ЭКО для отношения высоты цилиндра к диаметру его основания $n = 3$, штриховыми – ИКО боковой цилиндрической поверхности. Там же приведены для сравнения значения ИКО сферического КО.

№ п/п	Коэффициенты аппроксимации	Диапазон высот H в тысячах километров				
		0,2–2	2–5	5–10	10–20	20–40
1	a_1	0,7753	0,4995	0,4944	0,4063	0,3164
2	b_1	0,01652	0,0001099	0,0003042	0,0001966	0,0009266
3	c_1	0,08263	1,591	1,863	1,491	1,879
4	a_2	0,2248	0,5114	0,5458	0,6072	0,7152
5	b_2	0,04872	0,03407	0,03065	0,0269	0,02303
6	c_2	2,822	1,502	1,201	0,8528	0,5199
7	a_3	0,09587	0,1882	0,2149	0,1875	0,1162
8	b_3	0,002238	0,0006294	0,1171	0,0002392	0,0001389
9	a_4	0,3555	0,2039	0,1171	0,05989	0,02373
10	b_4	0,0002796	0,0001494	0,0001	0,0001	0

Таблица. Значения коэффициентов аппроксимации в формулах (10) и (11)

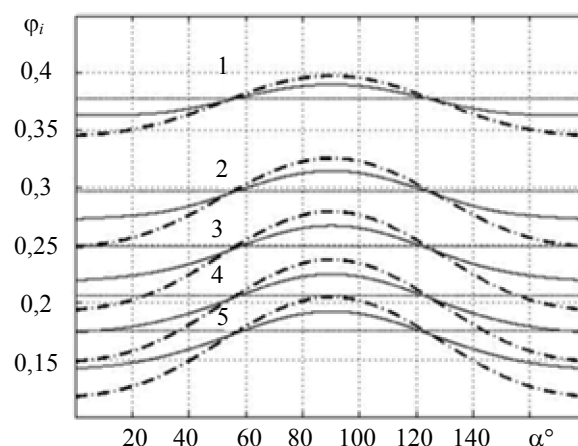


Рис. 2. Зависимость интегрального (штрихпунктирные линии) и эффективного (сплошные линии) коэффициентов облученности от угла наклона оси цилиндра при высотах h , км, равных: 200 (1), 600 (2), 1000 (3), 1500 (4), 2000 (5). Горизонтальными сплошными линиями указаны интегральные коэффициенты облученности сферического объекта

Как и ожидалось, погрешности расчета ЭКО меньше, чем вычисленных значений ИКО. Для вышеуказанных диапазонов изменения высоты ЦКО максимальные погрешности составляют 2%, –2,7%, 3,8%, –3,9% и 3,8%. Соответственно для цилиндра с умеренным отношением n погрешности определения среднеповерхностной температуры цилиндра будут меньше, чем в случае вытянутого цилиндра с большим n .

Обсуждение результатов

Предложенная методика расчета основывается на следующем алгоритме определения ЭКО для ЦКО. На первом этапе определяются значения функций $f(\alpha)$ и $\phi_m(H)$ для заданных угла наклона оси цилиндра и высоты ЦКО над поверхностью Земли по формулам (10) и (11). При этом используются значения коэффициентов в формулах из таблицы. Затем определяется значение ИКО боковой поверхности цилиндра ϕ_a по формуле (9), в которую подставляются также формулы для $\phi_b = \phi_{bc}$ из (4) и $\phi_m = \phi_0$ из (3). Затем полученное значение ИКО ϕ_a подставляется в (2) вместо значения ϕ_{int} . В ту же формулу (2) подставляется значение ϕ_b из (8), а также конкретная величина n . В результате получается значение ЭКО, которое для определения температуры ЦКО в тени Земли подставляется в формулу (1). При любой высоте ЦКО над поверхностью Земли погрешность расчета ИКО по формулам (9)–(11) при горизонтальном положении оси цилиндра, соответствующем максимальному значению ИКО, не превышает 1%. Максимальные погрешности реализуются в диапазоне изменения углов $20^\circ < \alpha < 60^\circ$, в котором осуществлялось «сшивание» зависимостей, вычисленных по двум моделям – ВМ 1 и ВМ 2. В указанной области изменения углов погрешности определения стационарных температур по формуле (1) не превышают 1,5 К для случая длин-

ного стержня (при $n > 10$). С уменьшением n погрешности определения ЭКО по формуле (2) снижаются, а при $n < 0,1$ (модель тонкого диска) расчеты становятся точными. Погрешности значительно снижаются также на солнечной стороне траектории и при расчетах нестационарного теплового режима. При α , равном 60° и 120° , значения ИКО и ЭКО цилиндра при $n = 3$, а также ИКО сферы примерно равны, причем ИКО сферы занимает промежуточное положение между значениями ИКО цилиндра при $\alpha = 0$ и $\alpha = \pi/2$.

Заключение

Предложенная приближенная аналитическая методика расчета эффективного коэффициента облученности для космического объекта цилиндрической формы реализует единственный способ преодоления неопределенностей в физической и математической моделях в области изменения углов наклона оси цилиндра до $\alpha \leq \theta_0$. Методика обеспечивает высокую для практических расчетов точность. Она проста в использовании и существенно облегчает расчеты нестационарных температур цилиндрического космического объекта. Альтернативой может быть численный расчет, обеспечивающий определение распределений поглощаемых лучистых потоков, а также температур по поверхности цилиндрического космического объекта. Такой расчет оправдан для определения температурных полей в объеме цилиндрических оболочечных конструкций с учетом прямой солнечной подсветки и отраженного Землей солнечного излучения. Однако на начальной стадии теплового проектирования телескопов космического базирования аналитические методы расчета незаменимы, поскольку позволяют быстро и надежно определять требования к основным параметрам конструкции на основе расчетов интегрального теплового баланса цилиндрического космического объекта.

Литература

1. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды / Под ред. Г.П. Петрова. М.: Машиностроение, 1971. 382 с.
2. Дубошин Г.Н. Небесная механика. Основные задачи и методы. М.: Наука, 1968. 800 с.
3. Чеботарев Г.А. Аналитические и численные методы небесной механики. М.–Л.: Наука, 1965. 367 с.
4. Сمارт У.М. Небесная механика. М.: Мир, 1965. 502 с.
5. Keihl J.T., Trenberth K.E. Earth's Annual Global Mean Energy Budget // Bull. Am. Meteorol. Soc. 1997. V. 78. N 2. P. 197–208.
6. Trenberth K.E., Fasullo J.T., Keihl J. Earth's global energy budget // Bull. Am. Meteorol. Soc. 2009. V. 90. N 3. P. 311–323.
7. Дульнев Г.Н., Семяшкин Э.М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. Л.: Энергия, 1968. 360 с.
8. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергия, 1975. 488 с.
9. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: Справочник: Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1979. 216 с.
10. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением: Пер. с англ. М.: Мир, 1975. 934 с.
11. Абдусаматов Х.И., Лаповок Е.В., Ханков С.И. Методы обеспечения термостабильности космического телескопа – солнечного лимбографа. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 195 с.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Баёва Ю.В., Ханков С.И. Обеспечение термостабильности телескопа дистанционного зондирования Земли за счет выбора параметров бленды // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56. № 5. С. 76–79.

Дзитолев Азамат Миронович

– адъюнкт, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, Россия, Санкт-Петербург, Dzitoi8@gmail.com

Ханков Сергей Иванович

– доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия, Leva0007@rambler.ru

Azamat Dzitoev

Postgraduate in a military academy, Military Space Academy n.a. A.F. Mozhaisky, Saint Petersburg, Russia, Dzitoi8@gmail.com

Sergei Khankov

D.Sc., leading scientific researcher, Military Space Academy n.a. A.F. Mozhaisky, Saint Petersburg, Russia, Leva0007@rambler.ru