

Литература

1. Волоконно-оптические датчики / Под ред. Т. Окоси: Пер. с япон. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1990. – 256 с.
2. Котов О.И., Лиокумович Л.Б., Марков С.И., Медведев А.В., Николаев В.М. Дистанционный интерферометрический датчик с поляризационным разделением каналов // Письма в ЖТФ. – 2000. – Т. 26. – № 10. – С. 28–34.
3. Патент EP2426880 A2 США, H04L27/22, 7.03.2012. Demodulation method / Kai Gossner; KROHNE Messtechnik GmbH. – EP20110006952; Заяв. 25 авг. 2011.
4. Котов О.И., Лиокумович Л.Б., Марков С.И., Медведев А.В., Николаев В.М. // Материалы V Международной НТК «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж, 1999. – Т. 3. – С. 1356–1366.
5. Мешковский И.К., Стригалева В.Е., Серебрякова В.С. Оптимизация параметров изготовления интегрально-оптических элементов для волоконно-оптических гироскопов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2008. – № 4 (49). – С. 42–53.
6. Мешковский И.К., Стригалева В.Е., Тараканов С.А. Закрытая схема обработки сигнала в волоконно-оптическом датчике тока // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 1 (65). – С. 10–15.

- Мирошниченко Георгий Петрович* – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, gpmirosh@gmail.com
- Дейнека Иван Геннадьевич* – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, vanodnk@gmail.com
- Погорелая Дарья Андреевна* – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, pdagia@mail.ru
- Шуклин Филипп Александрович* – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, инженер-исследователь, shuklin.philipp@gmail.com
- Смоловик Михаил Андреевич* – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, инженер-исследователь, ma.smolovik@gmail.com

УДК 520.224.2. 224.4

МЕТОДИКА РАСЧЕТА НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕМПЕРАТУР КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА, ДВИЖУЩЕГОСЯ ПО ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ОРБИТЕ

Ю.В. Баёва, Е.В. Лаповок, С.И. Ханков

Несмотря на большое количество публикаций, в настоящее время отсутствуют аналитические методики расчета, позволяющие определить изменение температуры космического объекта при его движении по вытянутой эллиптической орбите. Авторами разработана методика расчета нестационарных температур сферического оболочечного космического объекта при его движении по эллиптической орбите. Она включает определение зависимости высоты объекта над Землей от времени на основе решения уравнения движения по эллиптической орбите. По высоте орбиты в каждый момент времени вычисляются коэффициенты облученности, которые используются для определения величин падающих на аппарат удельных тепловых потоков от Земли и отраженного Землей солнечного излучения. Далее проводится расчет нестационарного теплового баланса с учетом прямой солнечной подсветки и среднеповерхностных температур. В качестве примера приведены результаты расчета нестационарного теплового режима космического объекта сферической формы для конкретных параметров орбиты в зависимости от его полной теплоемкости, определяемой толщиной стенки аппарата. Предложенная математическая модель проста и удобна для расчетов. Предложенный алгоритм расчета может быть распространен на другие выпуклые формы конструкции.

Ключевые слова: космический объект, эллиптическая орбита, удельный тепловой поток, нестационарная температура, нестационарный тепловой баланс.

Введение

В настоящее время возрастает актуальность разработки методов расчета тепловых режимов космических объектов (КО), движущихся по заданным орбитам (круговым и эллиптическим) в околоземном космическом пространстве (ОКП). Такие задачи обычно решаются с использованием сложных численных программ расчета. При этом расчеты разделяются на независимые этапы, включающие решение баллистической задачи [1–3], определение величины падающих на КО в ОКП лучистых тепловых потоков [4, 5], а также расчеты теплового режима КО [5]. Баллистическая часть задачи наиболее полно проработана [1–3]. Анализ конкретных практических задач показывает, что при движении КО по типовым орбитам реализуется его нестационарный тепловой режим, требующий применения численных методов

расчета, результаты которого обычно представляются в громоздком виде и трудны для интерпретации и определения основных закономерностей и обобщения выводов. При этом результаты расчетов всегда носят частный характер. Особое место занимают зарубежные статьи, содержащие результаты численных расчетов тепловых режимов конкретных конструкций телескопов космического базирования [6, 7].

При разработке методов обеспечения теплового режима космических аппаратов и бортовых приборов необходима информация о тепловом состоянии КО в каждой точке орбиты в самом обобщенном виде с учетом термоинерционных свойств КО. В связи с этим велика потребность в получении простых и доступных методик и алгоритмов расчетов, обеспечивающих наглядность описания без потери точности, хотя бы для наиболее простых выпуклых конфигураций КО. Для круговых орбит такая задача была решена авторами [8, 9], а решение для типовых случаев доведено до аналитических формул.

Целью настоящей работы являлась разработка методики расчетов нестационарных температур КО простейшей сферической формы, движущегося по вытянутой эллиптической орбите, при этом рассмотрена представляющая наибольший практический интерес оболочечная конструкция КО. Для достижения поставленной цели решались задачи расчета изменения во времени высоты КО над поверхностью Земли в зависимости от времени, определения полного нестационарного теплового баланса КО и его нестационарной температуры.

Задача решалась в рамках допущений об изотермичности поверхности Земли и ламбертовских законов отражения, а также об изотермичности КО. Эти ограничения соответствуют принципу поэтапного моделирования [10]. В результате могут быть получены эталонные решения, относительно которых можно на последующих этапах учитывать степень неизотермичности КО для частных случаев.

Методика расчетов

Методика расчетов, предложенная авторами, содержит последовательное решение трех задач, объединенных в общий алгоритм.

На первом этапе определяются координаты объекта в каждый момент времени и вычисляются расстояния от Земли до КО. На втором этапе составляется уравнение теплового баланса КО, рассчитываются коэффициенты облученности Землей и отраженным Землей солнечным излучением в функции высоты над поверхностью Земли. На основании вычисленных коэффициентов облученности определяются падающие на КО тепловые потоки. На третьем этапе из уравнения теплового баланса рассчитываются нестационарные температуры КО.

На основании закона Кеплера с дополнениями Ньютона можно определить зависимость во времени τ изменения угловой координаты радиус-вектора θ , а также расстояния от центра Земли до объекта r , движущегося по эллиптической траектории. Соответствующее уравнение может быть представлено в следующем виде:

$$\frac{d\theta}{d\tau} = DA(1 + e \cos \theta)^2; \quad D = \sqrt{GM}; \quad A = [a(1 - e^2)]^{-1.5}, \quad (1)$$

где e – эксцентриситет орбиты; $M = 6 \cdot 10^{24}$ кг – гравитирующая масса Земли; $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ Н·м²/кг² – гравитационная постоянная; a – большая полуось эллипса.

Текущее расстояние от центра гравитирующей массы до КО равно

$$r = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos \theta}. \quad (2)$$

Входящие в формулу (1) величины большой полуоси и эксцентриситета эллипса могут быть выражены через расстояния от центра Земли до КО в точках апогея r_a и перигея r_p :

$$a = \frac{r_a + r_p}{2}; \quad e = \frac{r_a - r_p}{2a}. \quad (3)$$

Значения r_a и r_p связаны с высотой орбиты соотношениями

$$r_a = h_a + R; \quad r_p = h_p + R,$$

где h_a и h_p – соответственно высота КО над поверхностью Земли в апогее и перигее; $R = 6371$ км – средний радиус Земли.

Энергетический баланс КО выпуклой формы произвольной конфигурации на любой орбите описывается одним нестационарным дифференциальным уравнением теплообмена вида [8]

$$C_s \frac{dT}{d\tau} + \varepsilon(1 - \varphi_s) \sigma T^4 = Q_2; \quad C_s = \frac{c_0 V}{S} = c_0 L; \quad c_0 = c\gamma; \quad Q_2 = Q_1 + Q_2 + Q_3. \quad (4)$$

где C_s – поверхностная плотность теплоемкости сферического КО, Дж/(м²·К); T – температура КО; τ – текущее время; ε – степень черноты поверхности КО; φ_s – интегральный коэффициент облученности (ИКО) внешней поверхности КО подсветкой Земли; Q_2 – суммарная поглощенная поверхностью КО удельная мощность излучения внешних источников (поток излучения Солнца Q_1 , поток излучения Земли Q_2 и отраженный Землей солнечный поток Q_3); c_0 , c , γ – соответственно объемная теплоемкость, удельная

теплоемкость и плотность материала КО; V – объем КО; S – площадь поверхности КО; L – определяющий размер КО.

Величины поглощенных наружной поверхностью КО удельных тепловых потоков в (4) определяются из соотношений

$$Q_1 = \alpha_s E \Phi f; \quad Q_2 = \varepsilon \varphi_s Q_0; \quad Q_3 = \alpha_s A E \varphi_k; \quad \Phi = S_m / S, \quad (5)$$

где α_s – коэффициент поглощения солнечного излучения покрытием на внешней поверхности наружного корпуса; $E = 1366 \text{ Вт/м}^2$ [11] – солнечная постоянная; f – коэффициент, равный единице на солнечном участке траектории и нулю – на теновом; ε – степень черноты наружной поверхности КО; $Q_0 = 239 \text{ Вт/м}^2$ [11] – поверхностная плотность мощности, излучаемая Землей; $A = 0,3$ [11] – альbedo Бонда Земли; φ_k – интегральный комбинированный коэффициент облученности (ИККО) внешней поверхности объекта подсветкой отраженного Землей солнечного излучения; Φ – отношение площади миделя S_m , т.е. проекции объекта на плоскость, перпендикулярную направлению на Солнце, к площади внешней поверхности КО S .

Для проведения конкретных расчетов по формулам (4)–(5) введем ограничения на параметры траектории и конфигурацию КО. Будем рассматривать солнечно-постоянную орбиту, что соответствует условию $f = 1$, и объект в виде сферической оболочки, что соответствует значению параметра $\Phi = 0,25$. Для сферической оболочки с постоянной толщиной стенки Δ определяющий параметр равен $L = \Delta$.

Для сферического объекта ИККО может быть представлен формулой [5]

$$\varphi_s = \frac{1}{2} (1 - \sqrt{1 - \varphi_0}); \quad \varphi_0 = \left(1 + \frac{h}{R} \right)^{-2},$$

где φ_0 – локальный коэффициент облученности для площадки, лежащей в плоскости местного горизонта; h – высота КО над поверхностью Земли.

Для сферического объекта в плоскости терминатора ИККО можно выразить с помощью следующих соотношений [8]:

$$\varphi_k = \frac{x^2}{6\pi} (1 + F); \quad F = \frac{1}{x^3} [2(1 - x^2)A - (2 - x^2)B]; \quad A = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{Y} d\theta; \quad B = \int_0^{\frac{\pi}{2}} Y d\theta;$$

$$Y = \sqrt{1 - \varphi_0 \sin^2 \theta}, \quad x = (1 + 0,157H)^{-1}, \quad H = \frac{h}{1000}.$$

В последней формуле h подставляется в километрах, а H – в тысячах километров.

Результаты расчетов

В качестве примера произведены расчеты для случая существенно вытянутой орбиты, когда $h_a = 40000 \text{ км}$, $h_p = 600 \text{ км}$. В этом случае $r_a = 46371 \text{ км}$, $r_p = 6971 \text{ км}$. По формулам (3) получим $a = 26671 \text{ км}$ и $e = 0,7387$. Для Земли $D = 2 \cdot 10^7$, а при данных значениях a и e получим $A = 2,37 \cdot 10^{-11}$.

В результате решения уравнения (1) после определения $\theta(\tau)$ и подстановки этой функции в (2) получена зависимость $r(\tau)$, а затем, после вычитания из нее величины R , определена зависимость $h(\tau)$, представленная на рис. 1.

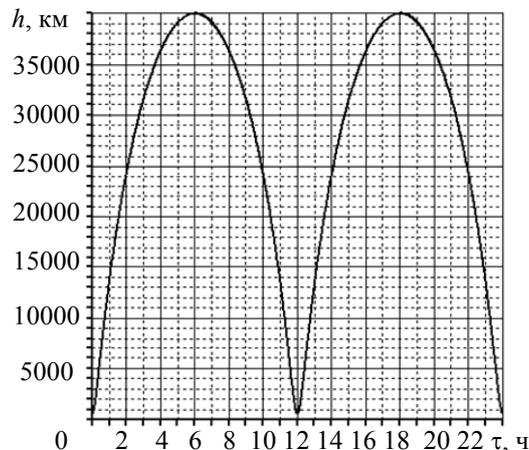


Рис. 1. Зависимость высоты орбиты космического объекта от времени при движении по эллиптической орбите

Как видно из рис. 1, значительное время (около 2 ч) КО находится в области геостационарной орбиты ($h = 35000\text{--}40000 \text{ км}$), примерно столько же времени движется от перигея к области геостационарной орбиты и от нее к точке перигея. Время пребывания КО вблизи точки перигея весьма незначительно.

Период движения КО по орбите составляет около 12 ч. Время нахождения КО на высотах менее 5000 км составляет не более 1 ч, а на высотах менее 1000 км – около 12 мин. Таким образом, время нахождения КО вблизи точки перигея крайне незначительно.

На рис. 2 представлены зависимости от времени движения по эллиптической орбите в течение двух циклов величин удельных тепловых потоков Q_2 и Q_3 . В общий поглощенный удельный тепловой поток Q_2 в каждый момент времени добавляется постоянный удельный тепловой поток $Q_1 = 341,5 \text{ Вт/м}^2$. Как видно из рис. 2, величина Q_3 (кривая 2) значительно меньше, чем Q_2 (кривая 1). Минимум в зависимости $Q_2(\tau)$ обусловлен тем, что коэффициент ϕ_k имеет максимум при высотах $h = 1500\text{--}2000 \text{ км}$, после чего убывает [8].

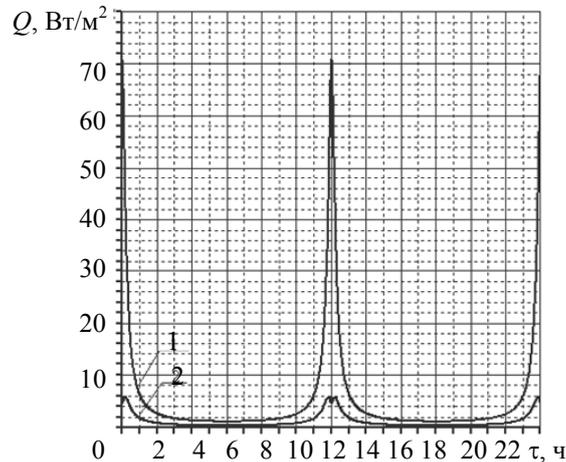


Рис. 2. Зависимость от времени падающего на сферический объект удельного теплового потока от Земли Q_2 (кривая 1) и отраженного Землей солнечного излучения Q_3 (кривая 2) при движении по эллиптической орбите

Расчеты нестационарных температур КО проводились для случая, когда его оболочка выполнена из сплава АМГ–6. В расчетах принимались следующие значения параметров: $c = 922 \text{ Дж/кг К}$; $\gamma = 2640 \text{ кг/м}^3$; $c_0 = 2,43 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К)}$; $\alpha_s = \varepsilon = 1$. Начальная температура КО принималась равной 300 К.

Результаты расчетов представлены на рис. 3. При толщине стенки менее 100 мкм ход температурной кривой в каждом цикле воспроизводит изменение поглощенного суммарного удельного теплового потока в соответствии с данными рис. 2. По этой причине минимальное значение толщины стенки в расчетах принято равным 1 мм (кривая 1). Как видно из рис. 3, при этой толщине стенки ход зависимости $T(\tau)$ достаточно близок к эпюре изменения поглощенного удельного теплового потока. При толщине стенки 1 см (кривая 2) зависимость $T(\tau)$ запаздывает в процессе охлаждения по мере приближения к точке апогея относительно $Q_2(\tau)$. При весьма большой толщине стенки (5 см, кривая 3) зависимость $T(\tau)$ входит в режим периодически повторяющейся циклограммы изменения температуры только через пять циклов относительно начального периода.

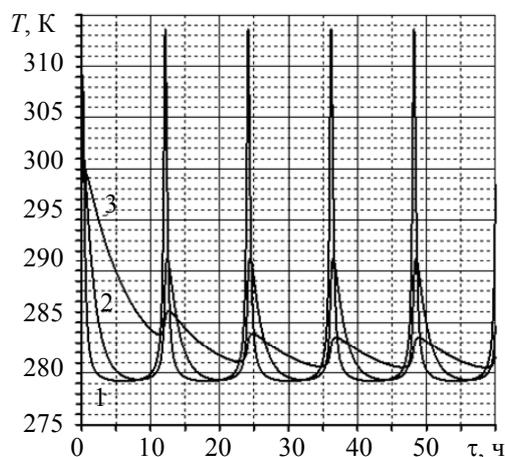


Рис. 3. Зависимость от времени средних температур оболочечного сферического объекта с объемной теплоемкостью $2,43 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К)}$, движущегося по эллиптической траектории. Кривые соответствуют толщине стенки объекта: 1 – 1 мм; 2 – 1 см; 3 – 5 см

Обсуждение результатов

Алгоритм расчетов нестационарных температур КО, движущегося по эллиптической орбите, включает уравнения движения (1)–(2), уравнение нестационарного энергетического баланса (4) с учетом (5) и формулы для расчетов коэффициентов облученности φ_s и φ_k . Формула для расчета коэффициента облученности КО Землей имеет общий вид для любых параметров орбиты, а для комбинированного коэффициента облученности вид формулы зависит от параметров траектории.

Для вытянутой эллиптической орбиты вследствие большого перепада высот КО над поверхностью Земли (рис. 1) имеют место существенные изменения падающего на КО удельного теплового потока от Земли, при этом удельный поток отраженного Землей солнечного излучения на порядок меньше потока теплового излучения Земли (рис. 2).

Вследствие весьма короткого времени нахождения КО в области точки перигея, как видно из рис. 2, возрастание падающего на КО потока собственного теплового излучения Земли имеет импульсный характер, как и прирост температуры КО с малой термической инерцией (рис. 3).

Граница малой термической инерции определяется толщиной стенки оболочечного КО менее 1 мм, а КО с толщиной стенки менее 100 мкм является абсолютно безынерционным, при этом ход температурной кривой такого КО воспроизводит циклограмму изменения падающих потоков.

По мере увеличения толщины стенки КО (рис. 3) с ростом поверхностной плотности его теплоемкости амплитуда колебаний температур уменьшается, причем за счет уменьшения положительного прироста температуры, тогда как минимальное значение температуры при толщине стенки до 1 см сохраняется. При очень большой толщине стенки (5 см) минимальное значение температуры несколько повышается, а КО входит в режим периодически повторяющейся циклограммы изменения температуры только после пяти циклов относительно начального первого периода.

Из структуры уравнения (4) и формул для удельных тепловых потоков (5) следует, что тепловой баланс и определяемый им температурный уровень КО существенно зависят от степени черноты поверхности КО и ее коэффициента поглощения солнечного излучения. В проведенных расчетах поверхность КО принята абсолютно черной во всем спектре падающего излучения ($\alpha_s = \varepsilon = 1$). В этом случае поглощенные КО потоки равны падающим. Температура КО может быть существенно понижена за счет уменьшения величины α_s . Влияние степени черноты на температурный уровень имеет более сложный характер, поскольку она влияет как на поглощаемый поток собственного излучения Земли, так и на излучаемый в космическое пространство поток.

Заключение

В работе впервые предложена методика сквозных расчетов, содержащая определение высоты космического объекта над поверхностью Земли по параметрам траектории, расчет коэффициентов облученности, определяющих величины падающих на него удельных тепловых потоков от Земли и отраженного Землей солнечного излучения, а с учетом прямой солнечной засветки – полного теплового баланса космического объекта. Последним этапом расчетов является определение нестационарных температур космического объекта при движении по эллиптической орбите. Рассмотрен космический объект сферической формы, однако предложенный алгоритм расчета может быть распространен на другие выпуклые формы конструкции. Расчеты проведены на примере солнечно-постоянной орбиты. Авторы считают, что возможен расчет и при любом угле наклона орбиты космического объекта, при этом различие будет состоять только в методике расчета комбинированного коэффициента облученности космического объекта отраженным Землей солнечным излучением.

Предложенный алгоритм расчетов отличается от известных тем, что является компактным, требует минимальных затрат времени без потери точности вследствие простоты и универсальности математической модели. Разработанная методика расчета позволяет определять температуру космического объекта в любой точке орбиты в условиях его естественного теплообмена с окружающей средой в зависимости от его поверхностной плотности теплоемкости.

Литература

1. Дубошин Г.Н. Небесная механика. Основные задачи и методы. – М.: Наука, 1968. – 800 с.
2. Чеботарев Г.А. Аналитические и численные методы небесной механики. – М.; Л.: Наука, 1965. – 367 с.
3. Сمارт У.М. Небесная механика. – М.: Мир, 1965. – 502 с.
4. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды / Под ред. Г.П. Петрова. – М.: Машиностроение, 1971. – 382 с.
5. Каменев А.А., Лаповок Е.В., Ханков С.И. Аналитические методы расчета тепловых режимов и характеристик собственного теплового излучения объектов в околоземном космическом пространстве. – НТЦ им. Л.Т. Тучкова, 2006. – 186 с.

6. Cullimore B. et al. Automated Multidisciplinary Optimization of a Space-based Telescope. – SAE 2002-01-2445, July 2002. – 9 p.
7. John W. Peři. Analytical Predictions for Lightweight Optics in a Gravitational and Thermal Environment // SPIE – the International Society for Optical Engineering. – 1987. – V. 748. – P. 172–179.
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. 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.
10. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Методы расчета теплового режима приборов. – М.: Радио и связь, 1990. – 312 с.
11. Trenberth K.E., Fasullo J.T. and Keihl J. Earth's global energy budget // Bull. Amer. Meteor. Soc. – 2009. – V. 90. – № 3. – P. 311–323.

- Баёва Юлия Валерьевна** – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, yul.bayo@yandex.ru
- Лаповок Евгений Владимирович** – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, научный сотрудник, Leva0007@rambler.ru
- Ханков Сергей Иванович** – Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Leva0007@rambler.ru