

УДК 629.7.05

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОВЫХ ФАКТОРОВ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА НА ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИНЗОВОГО ТЕЛЕСКОПА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА¹

© 2013 С.В. Цаплин, С.В. Большев²

Разработано программное обеспечение на базе программных пакетов ANSYS, MathCAD, Zemax по изучению влияния тепловых факторов космического пространства на оптические характеристики линзового объектива космического аппарата. Проведен расчет нестационарных полей температур и деформаций, выходных параметров линзового объектива для конкретного случая

Ключевые слова: температура, тепловой поток, тепловой режим, деформация, объектив, функция передачи модуляции.

Качество изображения оптической системы зависит как от дифракции света, так и от несовершенства системы (наличия остаточных aberrаций, дефектов стекла, деформаций), сборки и юстировки. Важной количественной характеристикой качества изображения служит разрешающая способность. В дополнение к разрешающей способности обычно вводится функция передачи модуляции, которая показывает, с какими искажениями по амплитуде и фазе объектив передает сигналы синусоидальной формы. Остаточные aberrации вызывают перераспределение световой энергии в дифракционной картине, а внутренние дефекты объектива приводят к образованию вредного рассеянного света, накладывающегося на оптическое изображение, что понижает разрешающую способность и контраст изображения. Деформации оптических элементов, вызванные градиентами температур, приводят к изменению геометрических характеристик — радиусов кривизны линз и, как следствие, к изменению разрешающей способности объектива. В данной статье проводится расчет влияния условий эксплуатации космического аппарата на выходные параметры оптической аппаратуры.

Оптические элементы (ОЭ) спецаппаратуры участвуют в тепловом обмене с элементами конструкции КА при их непосредственном контакте. Существенным оказывается и излучательный механизм теплообмена ОЭ с космическим пространством и элементами конструкции. Перечислим конкретно все механизмы теплообмена ОЭ, которые необходимо учитывать при расчете их теплового режима.

¹Работа выполнена при поддержке гранта Федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009–2013 годы, соглашение № 14.В37.21.1833.

²Цаплин Сергей Васильевич (tsaplin@samsu.ru), Большев Станислав Александрович (boluchevsa@mail.ru), лаборатория "Взаимодействие излучения с веществом" Самарского государственного университета, 443011, Российская Федерация, г. Самара, ул. Акад. Павлова, 1.

На рис. 1 приведен общий вид расчетной модели линзового телескопа, на рис. 2 показана оптическая схема объектива и ход лучей в ней.

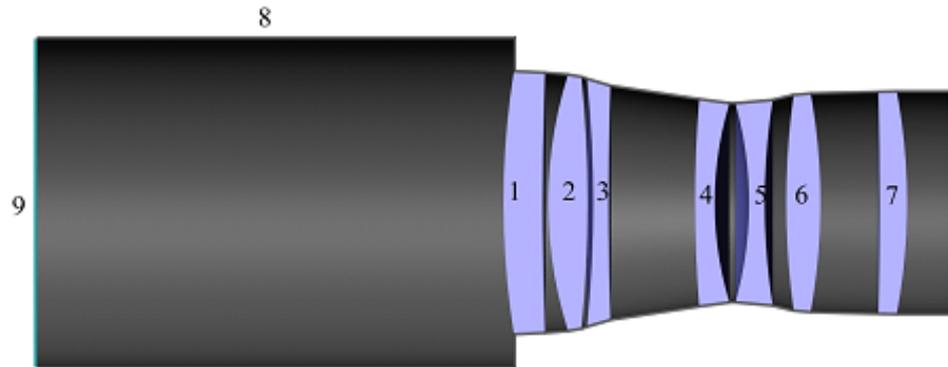


Рис. 1. Общий вид расчетной модели линзового телескопа: 1-7 – линзы, 8 – бленда, 9 – крышка

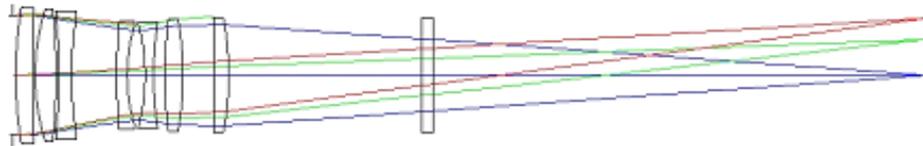


Рис. 2. Оптическая схема объектива и ход лучей в ней

Механизмы теплообмена ОЭ включают в себя:

- 1) тепловое излучение отраженного от Земли солнечного света;
- 2) тепловое излучение от элементов конструкции;
- 3) тепловой поток в зоне контакта ОЭ с элементом конструкции;
- 4) тепловой поток на заднюю поверхность ОЭ;
- 5) тепловое излучение от ОЭ в окружающее пространство.

Уравнение теплового баланса для оптического элемента, представляющего собой линзу со сферическими поверхностями, запишется следующим образом [1]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div} \kappa \cdot \operatorname{grad} T + Q, \quad (1)$$

где T – температура, ρ – плотность, c – теплоемкость, κ – коэффициент теплопроводности ОЭ. Величина $Q = Q(x, y, z)$ представляет собой объемную плотность поглощенной электромагнитной энергии. Эта величина учитывает поглощенную в объеме ОЭ тепловую энергию излучения. Если оптический элемент прозрачен для

теплового излучения, то эта величина равна нулю. В случае если ОЭ не прозрачен, величина Q определяется как

$$Q = \int \alpha(\lambda)q(\lambda, t)d\lambda, \quad (2)$$

где $\alpha(\lambda)$ – спектральный показатель поглощения излучения материалом ОЭ (λ – длина волны излучения), $q(\lambda, t)$ – спектральная интенсивность излучения со стороны земли и элементов КА, которая, естественно, зависит от времени.

Представим далее $q(\lambda, t)$ в виде суммы

$$q(\lambda, t) = q_0(\lambda, t) + q_1(\lambda, t) + q_2(\lambda, t), \quad (3)$$

где $q_0(\lambda, t)$ – спектральная интенсивность солнечного излучения, отраженного от Земли, $q_1(\lambda, t)$ – спектральная интенсивность излучения от крышки СЗУ к передней поверхности ОЭ, $q_2(\lambda, t)$ – спектральная интенсивность излучения от элементов конструкции к задней поверхности ОЭ, причем при закрытой крышке СЗУ $q_0 = 0$, а при открытой крышке СЗУ $q_1 = 0$.

Величина q_0 определяется спектром отраженного от Земли света и углом наклона β плоскости ОЭ к поверхности Земли

$$q_0 = q_3 \cos \beta, \quad (4)$$

где q_3 – спектральная интенсивность излучения Земли в направлении КА. Угол β может зависеть от времени.

Величина q_1 определяется спектром излучения крышки СЗУ. Если принять, что крышка СЗУ излучает, как черное тело, то

$$q_1 = \sigma T_1^4(t), \quad (5)$$

где T_1 – температура крышки, которая определяется из решения тепловой задачи для крышки СЗУ.

Величина q_2 определяется спектром излучения элементов конструкции. Если известна температура поверхностей конструкции с обратной стороны ОЭ, то

$$q_2 = \int \frac{1}{\pi R^2} \sigma T_2^4(t) \cos \psi \cos \gamma ds, \quad (6)$$

где ψ – угол между нормалью к элементу поверхности ds элемента конструкции и направлением от этого элемента к той точке поверхности ОЭ, где определяется величина q_2 , γ – угол между нормалью к поверхности ОЭ и этим направлением, R – расстояние между элементом ds и соответствующей точкой ОЭ. Интегрирование осуществляется по поверхности элементов конструкции, из точек которой (поверхности) видна точка поверхности ОЭ, для которой осуществляется расчет q_2 . Таким образом, для расчета q_2 необходимо знать геометрию элементов конструкции и их температурный режим.

При постоянных (не зависящих от температуры в рассматриваемом температурном интервале) плотности, теплоемкости и теплопроводности уравнение теплопроводности (1) заменим на уравнение температуропроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \Delta T + \frac{Q}{\rho c}, \quad (7)$$

где $a = \kappa/\rho c$ – коэффициент температуропроводности. После перехода к цилиндрическим координатам r, z, φ уравнение температуропроводности при условии аксиальной симметрии $\partial/\partial\varphi$ примет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{Q}{\rho c}. \quad (8)$$

Уравнение (8) следует дополнить начальными и граничными условиями. Начальное условие формулируется довольно просто

$$T|_{t=0} = T_0, \quad (9)$$

где T_0 – начальная температура ОЭ, в качестве которой примем температуру термостатирующей жидкости КА.

Граничные условия формулируются отдельно для передней и задней сторон ОЭ, а также для зоны контакта ОЭ с элементами конструкции.

На передней стороне ОЭ имеем

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial n} = -\varepsilon_0 \sigma T^4, \quad (10)$$

где ε_0 – степень “серости” материала ОЭ (отношение энергетической светимости материала ОЭ к энергетической светимости черного тела), а σ – постоянная Стефана – Больцмана. Вектор n в выражении (10) есть единичный вектор нормали к поверхности ОЭ, так что $\partial T / \partial n = (n \cdot \text{grad } T)$.

На задней стороне ОЭ положим, что

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial n} = q^+ - \varepsilon_T \sigma T^4, \quad (11)$$

где q^+ – тепловой поток со стороны среды между первым и вторым ОЭ (определяется из решения тепловой задачи для этой среды).

На площади контакта ОЭ с системой крепления

$$\kappa \frac{\partial T}{\partial n} = \kappa_3 \frac{\partial T_3}{\partial n}, \quad T = T_3, \quad (12)$$

где T_3 и κ_3 – температура и коэффициент теплопроводности материала крепления. Температура T_3 определяется из решения тепловой задачи для системы крепления ОЭ.

Постановка тепловой задачи для системы крепления. Система крепления ОЭ является основным каналом тепловых потоков от термостатированной части КА к ОЭ. Распределение температуры T_3 системы крепления определим из уравнения теплопроводности

$$\frac{\partial T_3}{\partial t} = a_3 \Delta T_3, \quad (13)$$

которое следует дополнить начальным условием (7) и граничными условиями (11) в зоне соединения с ОЭ и условием

$$T_3 = T_0 \quad (14)$$

в зоне контакта системы крепления с термостатирующей частью КА (T_0 – температура термостатирующей жидкости).

Тепловой режим крышки СЗУ при малой относительной поверхности контакта крышки с КА определяется в основном лучистым теплообменом между Землей и КА. Уравнение теплопроводности для крышки СЗУ запишется в форме

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = a_1 \Delta T_1. \quad (15)$$

Начальное условие можно взять в виде (7). Граничное условие на стороне, обращенной к Земле, имеет вид (предполагается полное поглощение энергии излучения от Земли крышкой СЗУ)

$$-\kappa_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} = Q_0(t), \quad (16)$$

где

$$Q_0(t) = \int q_0(\lambda, t) d\lambda, \quad (17)$$

а $q_0(\lambda, t)$ определено формулой (4). Граничное условие на обратной стороне крышки строится аналогично случаю с ОЭ. Имеем

$$-\kappa_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} = Q_2(t), \quad (18)$$

где

$$Q_2(t) = \int \frac{1}{\pi R^2} \sigma T_2^4(t) \cos \psi \cos \gamma ds. \quad (19)$$

Здесь ψ , γ и R определяются так же, как и в формуле (6).

Колебания тепловых потоков во времени приводят к изменению поля температур ОЭ, что в свою очередь является причиной его тепловых деформаций. Величина тепловых деформаций ОЭ может быть определена из решения системы уравнений термоупругости в перемещениях.

Пусть U есть вектор перемещений и пусть U_i есть i -я компонента этого вектора. Тогда система уравнений термоупругости запишется в форме [2]

$$\mu U_{i,kk} + (\lambda + \mu) U_{k,ki} - \gamma T_i = \rho \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} \quad (i, k = 1, 2, 3). \quad (20)$$

Здесь λ и μ – коэффициенты Лямэ, однозначно связанные с коэффициентом Пуассона ν и модулем Юнга E .

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu}, \quad \nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}. \quad (21)$$

Далее

$$\gamma = (3\lambda + \mu) \alpha_t, \quad (22)$$

где α_t – линейный коэффициент расширения материала ОЭ.

Индексы после запятой в (20) означают дифференцирование по соответствующей координате, по повторяющимся индексам производится суммирование.

Отметим, что поскольку в данной задаче скорости изменения температуры значительно ниже звуковых, то правой частью уравнения (20) можно пренебречь и решать квазистационарную задачу

$$\mu U_{i,kk} + (\lambda + \mu) U_{k,ki} = \gamma T_i. \quad (23)$$

В такой квазистационарной постановке все временные изменения компонент вектора перемещений будут определяться соответствующими изменениями температуры $T(x, y, z, t)$ ОЭ.

В цилиндрической системе координат при осевой симметрии ($\partial/\partial\varphi = 0$) уравнение (23) примет форму

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 U_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_r}{\partial r} + \frac{\partial^2 U_r}{\partial z^2} - \frac{U_r}{r^2} + \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial e}{\partial r} &= \frac{2(1+\nu)}{1-2\nu} \alpha_t T_r \\ \frac{\partial^2 U_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 U_z}{\partial z^2} + \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial e}{\partial z} &= \frac{2(1+\nu)}{1-2\nu} \alpha_t T_z, \end{aligned} \quad (24)$$

где U_r и U_z – компоненты вектора смещений в направлении r и z соответственно. Кроме того, введено обозначение

$$e = \frac{\partial U_r}{\partial r} + \frac{U_r}{r} + \frac{\partial U_z}{\partial z}. \quad (25)$$

К уравнениям (24) следует добавить граничные условия, которые в данном случае (в произвольной системе координат) принимают вид

$$\sigma_{ij}n_j = p_i. \quad (26)$$

Здесь

$$\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} + (\lambda e - T\gamma)\delta_{ij}, \quad (27)$$

где σ_{ij} – соответствующий элемент тензора напряжений, а ε_{ij} и δ_{ij} – обозначения для компонент тензора деформации и единичного тензора, т. е.

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(U_{i,j} - U_{j,i}), \quad (28)$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j, \\ 0, & i \neq j. \end{cases} \quad (29)$$

Величины n_i представляют собой компоненты вектора нормали в соответствующей точке поверхности ОЭ, а p_i – соответственно компонента удельной (поверхностно) внешней силы, действующей на соответствующую точку ОЭ со стороны других тел. Со стороны вакуума $p_i = 0$, с обратной стороны $p_i = p$, где p – давление между первым и вторым ОЭ. В точках контакта ОЭ с элементами крепления величина p_i определяется совместным решением задачи термоупругости для ОЭ и элемента крепления, либо используется упрощенная аппроксимация, например, модель свободных границ, или задаются перемещения.

В цилиндрической системе координат отличные от нуля (при осевой симметрии) компоненты тензора деформации связаны с компонентами вектора деформации следующим образом:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{rr} &= \frac{\partial U_r}{\partial r}, & \varepsilon_{\varphi\varphi} &= \frac{1}{r}U_r, & \varepsilon_{zz} &= \frac{\partial U_z}{\partial z}, \\ \varepsilon_{r\varphi} &= \varepsilon_{\varphi z} = 0, & \varepsilon_{zr} &= \frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_z}{\partial r} + \frac{\partial U_r}{\partial z}\right). \end{aligned} \quad (30)$$

Для постановки граничных условий необходимо задать потоки тепла или температуру на границах линзы, а также на поверхностях крышки и корпуса СЗУ. В точках крепления ОЭ с элементами конструкции теплообмен осуществляется за счет теплопроводности. Поэтому в этих точках граничные условия имеют вид:

$$T = T_k, \quad (31)$$

где T_k – температура корпуса объектива. А значение температуры на поверхности корпуса СЗУ задавалось по гармоническому закону

$$T_k = T_0 + \Delta T_k \sin(\omega_k t), \quad (32)$$

где T_0 – номинальное значение температуры, ΔT_k – амплитуда колебаний, а $\omega_k = \frac{2\pi}{\tau}$ – частота колебаний температуры корпуса объектива, τ – период колебаний.

Теплофизические характеристики ОЭ, используемые в расчете, приведены в табл. 1 [3].

Внутренняя поверхность крышки СЗУ имеет покрытие с $\varepsilon \geq 0,9$.

В расчетах полагалось, что средняя по поверхности температура корпуса объектива отвечает следующим условиям:

- 1) номинальное значение температуры находится в диапазоне 20 ± 5 °С;
- 2) отклонение температуры от номинального значения не превышает ± 5 °С;
- 3) скорость ухода от номинала температуры за 24 часа не превышает 0,5 °С;
- 4) интегральное среднеквадратичное отклонение температуры от номинального значения не превышает 0,22 °С за час.

Таблица 1

Теплофизические характеристики материалов оптических элементов

Характеристика	СТКЗ (1, 6 ОЭ)	ТК 21 (2, 7 ОЭ)	ОФ4 (3, 5 ОЭ)	ТФ 8 (4 ОЭ)
Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	0,82	0,69	0,72	0,686
Плотность, кг/м ³	3910	3980	3480	3860
Коэффициент теплоемкости, Дж/кг·К	425	456	545	460,9
Модуль Юнга, Па	$9,03 \cdot 10^{10}$	$7,94 \cdot 10^{10}$	$6,94 \cdot 10^{10}$	$5,47 \cdot 10^{10}$
Коэффициент Пуассона,	0,283	0,288	0,283	0,227
Коэффициент теплового расширения, 1/К	$79 \cdot 10^{-7}$	$81 \cdot 10^{-7}$	$52 \cdot 10^{-7}$	$86 \cdot 10^{-7}$

Амплитуда гармонических отклонений температуры от номинала указана в табл. 2.

Таблица 2

Амплитуда гармонических колебаний корпуса СЗУ от номинала

Период T , час	1,5	3	6	9	12	18	24	48
Амплитуда A , К	0,9	0,6	0,4	0,2	0,13	0,13	0,13	0,2

Суммарное максимальное время открытого состояния крышки СЗУ на витке (1,5 часа) — до 600 секунд.

Расчет проводится в следующей последовательности:

1. Подготовка исходных данных.
2. Расчет динамики изменения температурных полей и полей деформаций ОЭ объектива с помощью ПО ANSYS.
3. Расчет коэффициентов асферичности поверхностей ОЭ объектива в заданный момент времени с помощью ПО MathCAD.
4. Расчет выходных параметров оптической системы (абберации ОЭ объектива, функции размытия точки (ФРТ), функции передачи модуляции (ФПМ)) в заданный момент времени с помощью ПО ZEMAX.

Проведен расчет для следующего случая: при периодическом открытии крышки СЗУ (время открытия 10 мин, крышка открывается, когда температура на корпусе максимальна) температура на корпусе изменяется по гармоническому закону относительно номинальной температуры 293 К с периодом 1,5 часа и амплитудой колебаний 0,9 К.

Результаты расчетов приведены на рис. 3–5.

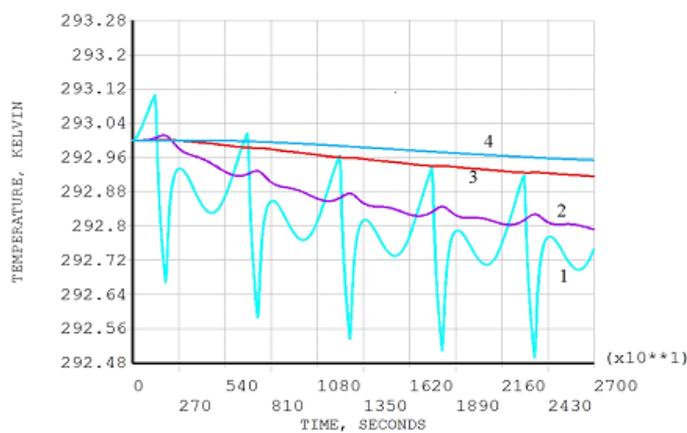


Рис. 3. Изменение температур поверхностей ОЭ от времени. 1, 2, 3, 4 – номер поверхности

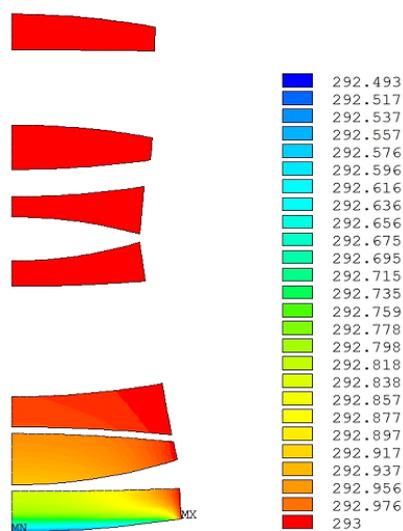


Рис. 4. Распределение температуры в ОЭ оптической системы в конце пятого открытия крышки

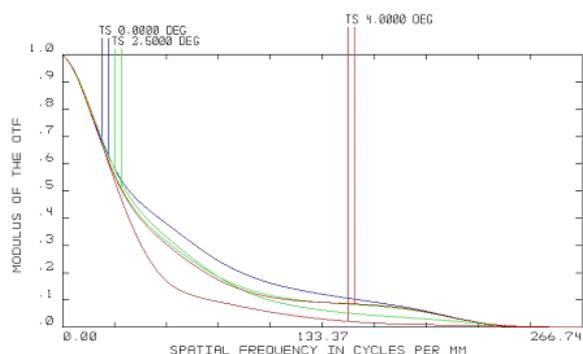


Рис. 5. ФПМ системы в конце 5 открытия крышки СЗУ. Поле зрения $0'$, $2,5'$, $4'$, диапазон длин волн $0,550\text{--}0,700$ мкм

Анализ полученных результатов показывает, что в данном случае воздействию подвергаются лишь первые два ОЭ, что приводит к максимальным осевым деформациям порядка $0,6\text{--}1,2$ мкм для первого ОЭ, $0,17\text{--}0,2$ мкм для второго ОЭ, в зависимости от момента открытия крышки. Из графиков изменения температур оптических поверхностей от времени (рис. 3) видно, что в результате периодических открытий крышки СЗУ система выходит на установившийся режим. Радиальный перепад температуры на первой оптической поверхности в конце пятого открытия крышки СЗУ составляет $0,5\text{--}0,57$ К. Если первое открытие крышки вызывает резкую деформацию первой оптической поверхности, что снижает значения ФПМ на $21,45\%$, то с течением времени происходит выравнивание температур ОЭ, и значения ФПМ приближаются к значениям ФПМ недеформированного объектива.

Таким образом, наибольшее воздействие от периодических колебаний температуры на бленде и от открытий крышки испытывает фронтальная поверхность первой линзы. Периодические колебания температуры на бленде вызывают колебания температуры фронтальной поверхности первой линзы, а открытия крышки вызывают снижение температуры фронтальной поверхности первой линзы, причем по величине воздействия эти факторы сравнимы между собой. С течением времени изменение температуры, вызванное этими факторами, распространяется вглубь первой линзы в осевом направлении и далее на остальные оптические элементы. Соответственно, максимальные тепловые деформации также будет испытывать первый оптический элемент. Наличие деформаций оптических элементов ухудшает качество получаемых изображений и не позволяет увеличить продолжительность съемки на витке. Для повышения точности поддержания температур оптических элементов телескопа необходимо понижение номинальной температуры системы до 10°C и применение системы обеспечения теплового режима на основе пленочных электронагревателей [4–6].

Литература

- [1] Исаченко В.П. Теплопередача. М.: Энергия, 1975.
- [2] Новацкий В. Вопросы термоупругости. М.: Иностран. лит., 1962.

- [3] ГОСТ 13659 – 78. Стекло оптическое бесцветное. Физико-химические характеристики. Основные параметры. М., 1978.
- [4] Цаплин С.В., Болычев С.А. Моделирование температурного поля оптико-электронного телескопического комплекса космического аппарата: сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 50-летию образования ЦСКБ и 90-летию со дня рождения Д.И. Козлова, Самара, 28 сентября – 3 октября 2009 г. Самара: ФГУП "ГНПРКЦ "ЦСКБ-Прогресс", 2009, С. 125–130.
- [5] Цаплин С.В., Болычев С.А. Моделирование системы термоградиентной стабилизации оптико-электронного телескопического комплекса космического аппарата: сборник трудов XXXI Российской школы по проблемам науки и технологий, Миасс, 14–16 июня 2011 г., Миасс, 2011.
- [6] Цаплин С.В., Болычев С.А. Моделирование температурных полей телескопа при воздействии условий эксплуатации КА // Научные и технологические эксперименты на автоматических космических аппаратах и малых спутниках: сборник трудов международной конференции. Самара, 2011.

Поступила в редакцию 30/*XII*/2012;
в окончательном варианте – 31/*XII*/2012.

MODELING OF INFLUENCE OF THERMAL SPACE FACTORS ON OPTICAL CHARACTERISTICS OF LENS TELESCOPE OF SPACECRAFT

© 2013 S.V. Tsaplin, S.A. Bolychev³

The software based on software packages ANSYS, MathCAD, Zemax is developed to study the effects of thermal factors of space on the optical characteristics of spacecraft lens telescope. The calculation of time-dependent temperature and strain fields, the output parameters of optical system is carried out.

Key words: temperature, thermal flow, thermal rate, deformation, lens, modulation transfer function.

Paper received 30/*XII*/2012.
Paper accepted 31/*XII*/2012.

³Tsaplin Sergey Vasilievich (tsaplin@samsu.ru), Bolychev Stanislav Alexandrovich (bolychevsa@mail.ru), Laboratory of Radiation-Matter Interaction, Samara State University, Samara, 443011, Russian Federation.