РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 621.373.526

РАСЧЕТ ТЕРМОАБЕРРАЦИЙ СОЛНЕЧНОГО ТЕЛЕСКОПА-ЛИМБОГРАФА КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

© 2006 г. **Х. И. Абдусаматов**, доктор физ.-мат. наук; **С. И. Ханков,** доктор техн. наук

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория, Санкт-Петербург

Проведены исследования термоаберраций космического лимбографа космического базирования. Расчеты проводились для случая его работы в циклическом режиме: 30 мин – наблюдение за Солнцем, 60 мин – перерыв, количество циклов – 12. Показано, что при использовании в качестве материала для зеркал высокотеплопроводного карбида кремния в них практически не возникают значимые температурные градиенты и термодеформации. Максимальное искажение профиля зеркал не превышает ~ 10^{-5} мкм, что вполне удовлетворяет допуску $\Lambda/50$. Тепломеханическая структура конструкции космического комплекса позволит обеспечить устойчивое высокое качество изображения оптики и другие сквозные характеристики оптико-приемного блока лимбографа в целом.

Коды OCIS: 080.1010, 110.3000.120.4570, 120.0280, 350.1260, 350.6050.

Поступила в редакцию 06.04.2005.

Известно, что наблюдения Солнца всегда осложнены значительным термическим влиянием интегрального потока его излучения на оптико-механические и фотоприемные узлы телескопа и оно многократно усиливается при наблюдениях полного солнечного диска из космоса. При этом, когда интенсивный поток солнечного излучения направлен непосредственно во входной зрачок при периодическом наблюдении Солнца, проблема сохранения качества изображения оптики состоит в удержании термомеханического состояния всей структуры телескопа вблизи исходного (до открытия крышки входного зрачка).

Проектом "Астрометрия" [1, 2] предусмотрено измерение временны́х вариаций формы лимба и диаметра диска Солнца с погрешностью ~ 0,005″ на служебном модуле (СМ) российского сегмента (РС) Международной космической станции (МКС). В связи с этим для решения термических проблем, связанных с влиянием интегрального потока излучения полного диска Солнца на стабильность качества оптики и механической структуры телескопа и фотоприемного блока, разработан и запатентован уникальный солнечный лимбограф (СЛ) космического базирования, имитирующий кольцеобразное солнечное затмение [3]. Оптическая система (ОС) СЛ представляет собой телескопическую систему Грегори, в промежуточном фокусе которой устанавливается искусственная "луна", перекрывающая около 95% изображения солнечного диска и обеспечивающая наблюдение только за краем и отдельными участками диска Солнца. "Луна" представляет собой непрозрачный эллиптический экран с поперечным диаметром 1860″ с двумя центральными отверстиями, установленный под углом 12° по отношению к плоскости, перпендикулярной к оптической оси. Отраженный зеркальной поверхностью "луны" поток лучистой энергии Солнца, падающий сходящимся пучком от главного зеркала СЛ, выводится наружу через отверстие в корпусе лимбографа.

Солнечный лимбограф со световым диаметром главного зеркала 200 мм (СЛ-200), тепломеханическая схема которого представлена на рис. 1, предназначен для наблюдения за краем диска Солнца и двумя выбранными центральными участками самого диска и в настоящее время находится в стадии проектирования, которое ведется ВНЦ "ГОИ им. С.И. Вавилова" под руководством Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН. Дифракционное качество изображения СЛ и стабильность теплового режима всей структуры лимбографа вблизи исходного состояния должны обеспечиваться при прямом периодическом облучении его входного зрачка солнечным излучением. Лимбограф СЛ-200 планируется крепить на выносной штанге за пределами корпуса СМ РС МКС на расстоянии около 1000 мм.

Основной защитой от мощного потока солнечного излучения являются отражающие покрытия на поверхностях светофильтра – кварцевой пластины, установленной на входном зрачке СЛ, ослабляющие мощность лучистого потока в ~ 100 раз. Разработанная автономная система обеспечения теплового режима (АСОТР) включает регулируемые электро-

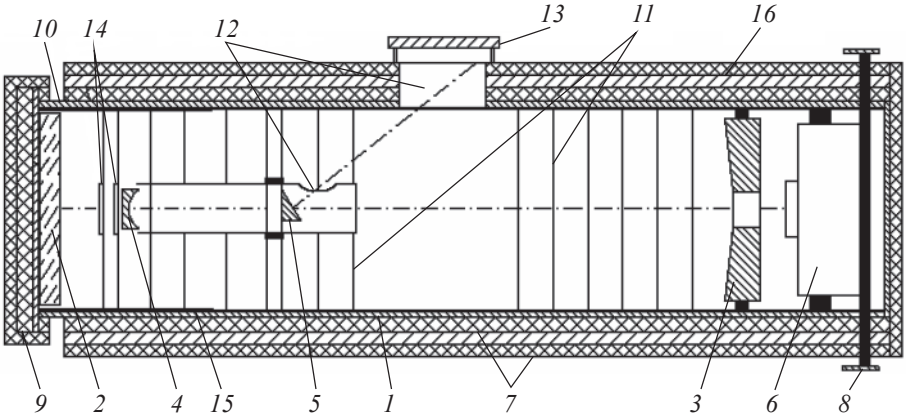


Рис. 1. Тепловая схема лимбографа СЛ-200. *1* – корпус телескопа, *2* – светофильтр, *3* – главное зеркало, *4* – вторичное зеркало, *5* – "луна", *6* – ФПУ, *7* – ЭВТИ, *8* – радиатор, *9* – теплозащитная крышка объектива, *10* – щелевидная радиационная панель, *11* – кольца светозащитной бленды, *12* – разрезы для пропускания излучения, отражаемого "луной", *13* – теплозащитная крышка трубы, *14* – радиационные экраны, *15* – теплозащитная бленда из алюминия, *16* – тепловыравнивающая труба.

нагреватели общей мощностью до 100 Вт, а также наружную экранно-вакуумную теплоизоляцию (ЭВТИ). Корпус (труба) лимбографа снаружи покрывается двумя слоями ЭВТИ по 10 мм, между которыми размещается труба из дюралюминия для выравнивания температур вдоль оптической оси и по всему объему трубы. К пассивным элементам АСОТР можно отнести систему экранировки вторичного зеркала от прямого солнечного облучения, внешние радиационные панели, теплозащитную бленду из алюминия (позиция *15* на рис. 1) для выравнивания температуры от потока солнечного излучения при наблюдении за звездами, а также кольца теплозащитной бленды, устанавливаемые внутри корпуса объектива. Такая АСОТР в рабочем режиме может поддержать температуру зеркал и корпуса трубы лимбографа в диапазоне не более ±1,0 K при разнице температур между зеркалами и корпусом не более ±0,5 K.

Термоаберрационные расчеты [4–8] предназначены для исследования термоустойчивости оптической системы, для определения допустимых перепадов температур между элементами ОС, а также для обеспечения теплового режима ОС с целью сохранения дифракционного качества изображения и стабильности положения фокальной плоскости.

Главное зеркало имеет световой диаметр $D = 200$ мм и центральное экранирование $d = 54$ мм. Параксиальный радиус эллипсоидального главного зеркала равен $R_г = 1360{,}52$ мм. Вторичное эллипсоидальное зеркало имеет световой диаметр $D_в = 44$ мм. В рассматриваемом случае большая полуось эллипса вторичного зеркала $a = 477{,}635$ мм, а квадрат отношения длины малой и большой полуосей эллипса составляет $\omega = 0{,}43915$. Расстояние между зеркалами $L = 800$ мм. Фокус оптической системы составляет $f = 4800$ мм, относительное отверстие $A = 1{:}26$, диаметр дифракционного кружка с учетом экранирования $d_{диф} = 34$ мкм (при входном зрачке 188 мм).

Зеркала предполагается выполнить из карбида кремния, коэффициент температурного линейного расширения которого составляет $\alpha_з = 2{,}4 \times 10^{-6}$ K^{-1}, а коэффициент теплопроводности $\lambda = 185$ Вт/мК [9]. Корпус СЛ-200 предполагается изготовить из инвара с коэффициентом температурного линейного расширения $\alpha_к = 1{,}9 \times 10^{-6}$ K^{-1} [7].

Исходя из критерия необходимости обеспечения погрешности в определении формы лимба и диаметра диска Солнца не более 0,005″ нами задано допустимое смещение фокальной плоскости ОС СЛ-200 относительно плоскости установки фоточувствительных элементов фотоприемного устройства $\Delta f \le 26$ мкм. Допустимое максимальное термоискажение профилей рабочих поверхностей зеркал $\Lambda/50$, где основная длина волны составляет $\Lambda = 0{,}546$ мкм, т. е. максимальное допустимое искажение профиля зеркала в абсолютных величинах $U = 1{,}1 \times 10^{-2}$ мкм.

В основу расчета положены аналитические методики, включающие алгоритмы и расчетные формулы, полученные ранее в [4–8]. На данном этапе рассчитываются величины термического смещения фокуса Δf и продольная сферическая термоаберрация ΔS в виде зависимостей от перегрева зеркал и корпуса телескопа.

Термическое смещение фокуса для телескопа Грегори, обусловленное различием температур его элементов, определяется по формуле [7]

$$\Delta f = \left(R_г \frac{\delta h_г}{2} - L\delta h_к \right) \Phi_г(\rho_0) + a\delta h_в \Phi_в(\rho_0), \qquad (1)$$

$$\rho_0 = \frac{y_{\min}}{R_г},\ \delta h_i = \alpha_i \vartheta_i,\ \vartheta_i = t_i - t_0,$$

где δh_i – единичные деформации i-го элемента; α_i – коэффициенты линейного расширения; ϑ_i – пере-

грев i-го элемента относительно начальной температуры t_0; $y_{\min}$ – минимальная координата y в пределах светового диаметра, при отсутствии центрального экранирования $y_{\min} = 0$, что соответствует параксиальному лучу; $\Phi_г$ и $\Phi_в$ – координатные функции деформаций.

Для длиннофокусных систем функции $\Phi_г$ и $\Phi_в$ определяются соотношениями [7]

$$\left.\begin{aligned} &\Phi_г = \Phi_{г0} - \Delta\Phi_г\rho_0^2, \quad \Phi_в = \Phi_{в0} - \Delta\Phi_в\rho_0^2, \\ &\Phi_{г0} = c^2 = \left(\frac{1+e}{1-e}\right)^2, \quad \Phi_{в0} = 2c = 2\frac{1+e}{1-e}, \\ &\Delta\Phi_г = 8\frac{e}{1-e}\frac{1+e^2}{1-e^2}, \quad \Delta\Phi_в = (1-e)\Delta\Phi_г = 8e\frac{1+e^2}{1-e^2}. \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

где e – эксцентриситет эллипса:

$$e = \sqrt{1-\omega},\ c = \frac{1+e}{1-e}.$$

После подстановки в (2) всех параметров ОС можно получить

$$\begin{aligned} &e = 0{,}749;\ c = 6{,}965;\ \Phi_{г0} = 48{,}5;\ \Delta\Phi_{в0} = 21; \\ &\Delta\Phi_г = 85;\ \Phi_г = 48{,}5 - 85\rho_0^2;\ \Phi_в = 13{,}9 - 21\rho_0^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Поскольку $\rho_0^2 = 4\times10^{-4}$, то для расчетов величины Δf следует принять

$$\Phi_г \approx \Phi_{г0} = 48{,}5 \text{ и } \Phi_в \approx \Phi_{в0} = 13{,}9.$$

Таким образом, в соотношении (3) вместо $\Phi_г$ и $\Phi_в$ с малой погрешностью можно подставить значения $\Phi_{г0}$ и $\Phi_{в0}$, в результате получим

$$\begin{aligned} &\Delta f = A_г\delta h_г - A_к\delta h_к + A_в\delta h_в, \\ &A_г = \frac{R_г}{2}c^2,\ A_к = Lc^2,\ A_в = 2ac. \end{aligned} \quad (4)$$

Это же соотношение можно выразить не через единичные деформации $\delta h_i = \alpha_i\vartheta_i$, а через перегревы элементов ϑ_i:

$$\begin{aligned} &\Delta f = B_г\vartheta_г - B_к\vartheta_к + B_в\vartheta_в; \\ &B_г = \alpha_г A_г;\ B_к = \alpha_к A_к;\ B_в = \alpha_в A_в. \end{aligned} \quad (5)$$

Подставив в (4) и (5) все значения параметров ОС с учетом того, что оба зеркала выполнены из карбида кремния и $\alpha_г = \alpha_в = \alpha$, определим значения A_i и B_i. Эти данные представлены в табл. 1.

Набор значений коэффициентов $A_г$, $A_к$, $A_в$ является неизменной характеристикой конкретного телескопа. Значения $B_г$, $B_к$, $B_в$ постоянны для того же телескопа с зеркалами из карбида кремния и с корпусом из инвара.

Из соотношения (5) можно определить зависимости смещения фокуса от перегрева корпуса при различных перегревах вторичного зеркала и при заданном перегреве главного зеркала. Такие зависимости представлены на рис. 2. Расчеты проводились при $\vartheta_г = 0{,}3$ K. Как видно из рисунка, максимальные значения термонаведенного смещения фокуса реализуются при $\vartheta_к = 0$, т. е. тогда, когда инваровый корпус термостабилизирован. Наличие малых значений Δf в области $0{,}3 < \vartheta_к < 0{,}45$ K указывает на возможность тепловой компенсации смещения фокуса за счет термостабилизации корпуса в пределах определенного температурного уровня.

Таблица 1. Значения коэффициентов $A_i \times 10^{-3}$ (в ед. мм) и B_i (в ед. мкм/K) для лимбографа СЛ-200

$A_г$	$A_к$	$A_в$	$B_г$	$B_к$	$B_в$
33,0	39,0	6,0	79,2	74,1	15,8

Условие компенсации можно получить из (5), полагая $\Delta f = 0$. В этом случае оно может быть записано в виде соотношения

$$\begin{aligned} &\vartheta_к = D_г\vartheta_г + D_в\vartheta_в, \\ &D_г = \frac{\alpha_г}{\alpha_к}\frac{R_г}{2L},\ D_в = 2\frac{\alpha_в}{\alpha_к}\frac{a}{Lc}. \end{aligned} \quad (6)$$

При выводе формул для расчетов термонаведенной продольной сферической аберрации используем соотношение [7]

$$\Delta S = \Delta f(\rho_0) - \Delta f(\rho_m),\ \rho_m = \frac{y_{\max}}{R_г} = 0{,}0735, \quad (7)$$

где $y_{\max}$ – координата зеркала на краю светового диаметра.

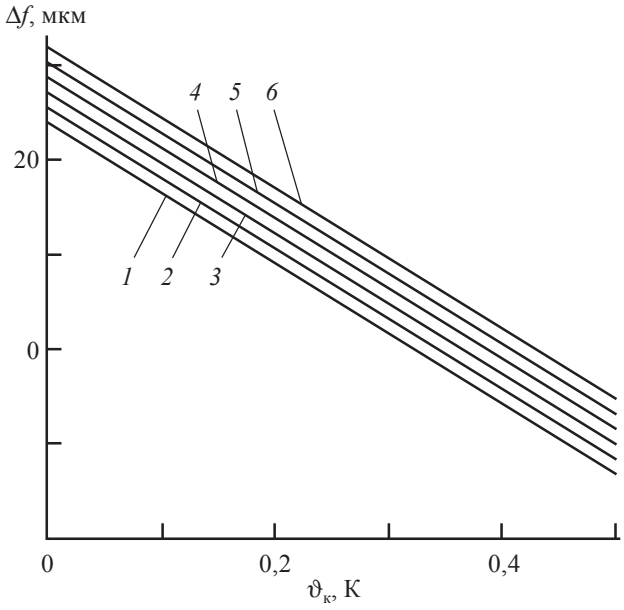


Рис. 2. Зависимость термонаведенного смещения фокуса телескопа лимбографа СЛ-200 от перегрева его корпуса при перегреве главного зеркала $\vartheta_г = 0{,}3$ K и при различных перегревах вторичного зеркала: $\vartheta_в = 0$ (*1*), 0,1 (*2*), 0,2 (*3*), 0,3 (*4*), 0,4 (*5*), 0,5 K (*6*).

Учтем, что из (3) следует

$$\left.\begin{aligned}\Phi_{\text{г}}(\rho_0)-\Phi_{\text{г}}(\rho_m)=\Delta\Phi_{\text{г}}\left(\rho_m^2-\rho_0^2\right)=0{,}475,\\ \Phi_{\text{в}}(\rho_0)-\Phi_{\text{в}}(\rho_m)=\Delta\Phi_{\text{в}}\left(\rho_m^2-\rho_0^2\right)=0{,}12.\end{aligned}\right\} \quad (8)$$

После подстановки (1) в (7) с учетом (8) можно получить

$$\Delta S = G_{\text{г}}\delta h_{\text{г}} - G_{\text{к}}\delta h_{\text{к}} + G_{\text{в}}\delta h_{\text{в}},$$

$$G_{\text{г}} = \frac{R_{\text{г}}}{2}\Delta\Phi_{\text{г}}\left(\rho_m^2-\rho_0^2\right), \quad (9)$$

$$G_{\text{к}} = L\Delta\Phi_{\text{г}}\left(\rho_m^2-\rho_0^2\right),\ G_{\text{в}} = a\Delta\Phi_{\text{в}}\left(\rho_m^2-\rho_0^2\right).$$

После подстановки в G_i всех значений параметров можно получить следующее количественное соотношение:

$$\Delta S = (3{,}23\delta h_{\text{г}} - 3{,}8\delta h_{\text{к}} + 0{,}57\delta h_{\text{в}})\times 10^5. \quad (10)$$

В случае равенства между собой величин единичных деформаций, т. е. при равномерном нагреве или охлаждении всего телескопа, все элементы которого выполнены из материала с одинаковым коэффициентом линейного расширения, сферическая термонаведенная аберрация не будет развиваться. Для случая $\alpha_{\text{г}} = \alpha_{\text{в}} = 2{,}4\times 10^{-6}$ K^{-1}, а $\alpha_{\text{к}} = 1{,}9\times 10^{-6}$ K^{-1} получим вместо (10)

$$\Delta S = 0{,}775\vartheta_{\text{г}} - 0{,}722\vartheta_{\text{к}} + 0{,}137\vartheta_{\text{в}}. \quad (11)$$

В случае равномерного нагрева всей системы $\Delta S(\vartheta_{\text{г}} = \vartheta_{\text{к}} = \vartheta_{\text{в}} = \vartheta) = 0{,}19\vartheta$ мкм. Например, при перегреве $\vartheta = 30$ K получим ΔS ($\vartheta = 30$ K) = 5,7 мкм.

Перейдем к расчету вариаций температур оптических элементов. Нестационарный тепловой баланс системы трех тел (главное зеркало, вторичное зеркало и корпус) в режиме наблюдения за Солнцем описывается системой трех дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\left.\begin{aligned}C_{\text{г}}\frac{dT_{\text{г}}}{d\tau}+\sigma_{\text{гк}}(T_{\text{г}}-T_{\text{к}})=\chi_{\text{г}}tES_{\text{г}},\\ C_{\text{в}}\frac{dT_{\text{в}}}{d\tau}+\sigma_{\text{вк}}(T_{\text{в}}-T_{\text{к}})=\varepsilon_{\text{пр}}tES_{\text{в}}+\chi_{\text{л}}(1-\chi_{\text{г}})\chi_{\text{в}}tES_{\text{в}},\\ C_{\text{к}}\frac{dT_{\text{к}}}{d\tau}+\sigma_{\text{гк}}(T_{\text{к}}-T_{\text{г}})+\sigma_{\text{вк}}(T_{\text{к}}-T_{\text{в}})=0,\end{aligned}\right\} \quad (12)$$

где T_i – температура i-го элемента, τ – текущее время, C_i – полная теплоемкость i-го элемента, σ_{ij} – тепловая проводимость между элементами i и j (индексы i и j означают: г – главное зеркало, в – вторичное зеркало, к – корпус); $\chi_{\text{г}}$, $\chi_{\text{в}}$ – доли поглощенной энергии солнечного излучения рабочими поверхностями соответственно главного и вторичного зеркал; t – пропускание светофильтра на входе оптической системы; $\chi_{\text{л}}$ – доля энергии солнечного излучения, приходящего на рабочую поверхность вторичного зеркала после отражения от главного; $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты системы двух экранов перед тыльной поверхностью вторичного зеркала, E – солнечная постоянная, $S_{\text{г}}$ и $S_{\text{в}}$ – площади сечения рабочих поверхностей главного и вторичного зеркал.

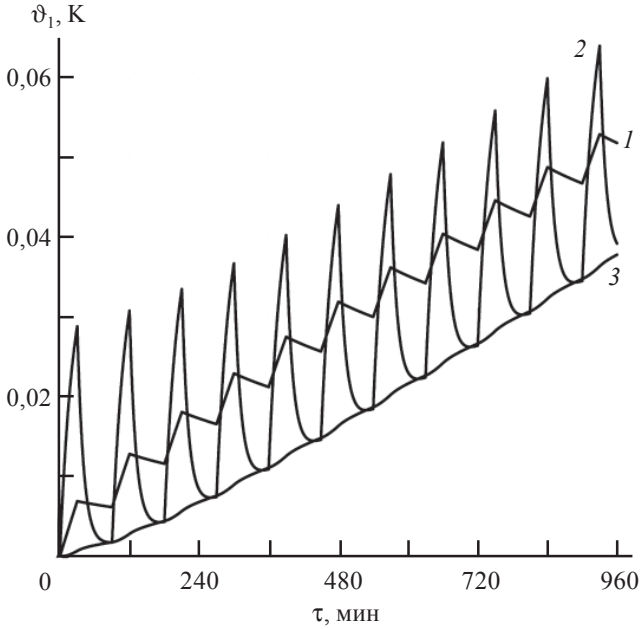


Рис. 3. Зависимости перегревов элементов телескопа-лимбографа СЛ-200 (*1–3*) от времени работы в циклическом режиме (30 мин – наблюдение за Солнцем, 60 мин – перерыв) при ослаблении солнечного излучения светофильтром в 100 раз и при степени черноты поверхностей двух экранов перед вторичным зеркалом $\varepsilon = 0{,}02$. *1* – главное зеркало, *2* – вторичное зеркало, *3* – инваровый корпус.

В перерывах между сеансами и сериями наблюдений $E = 0$ и система уравнений отличается от (12) тем, что правые части первого и второго уравнений равны нулю.

В расчетах принято: $C_{\text{г}} = 1100$ Дж/K, $C_{\text{в}} = 20$ Дж/K, $C_{\text{к}} = 10^3$ Дж/K, $\sigma_{\text{гк}} = 0{,}044$ Вт/K, $\sigma_{\text{вк}} = 0{,}015$ Вт/K, $E = 1400$ Вт/м^2, $\chi_{\text{г}} = \chi_{\text{в}} = 0{,}01$, $t = 0{,}01$, $\chi_{\text{л}} = 0{,}07$, $\varepsilon_{\text{пр}} = 0{,}004$, $S_{\text{г}} = 3{,}14\times 10^{-2}$ м^2, $S_{\text{в}} = 1{,}5\times 10^{-3}$ м^2.

Расчеты перегревов и термонаведенного смещения фокуса проводились для случая работы лимбографа СЛ-200 в циклическом режиме: 30 мин – наблюдение за Солнцем, 60 мин – перерыв, максимальное количество циклов, предусмотренных космическим экспериментом “Астрометрия”, – 12.

Результаты расчетов зависимости перегревов элементов телескопа от времени работы в циклическом режиме наблюдения за Солнцем представлены на рис. 3. Эти зависимости получены на основе численного решения системы уравнений (12). При этом перед началом каждого сеанса нагрева в систему (12) подставлялись начальные значения, соответствующие температуре конца времени охлаждения, и наоборот. Как видно из рисунка, максимальные колебания температур характерны для вторичного зеркала, а для корпуса СЛ-200 наблю-

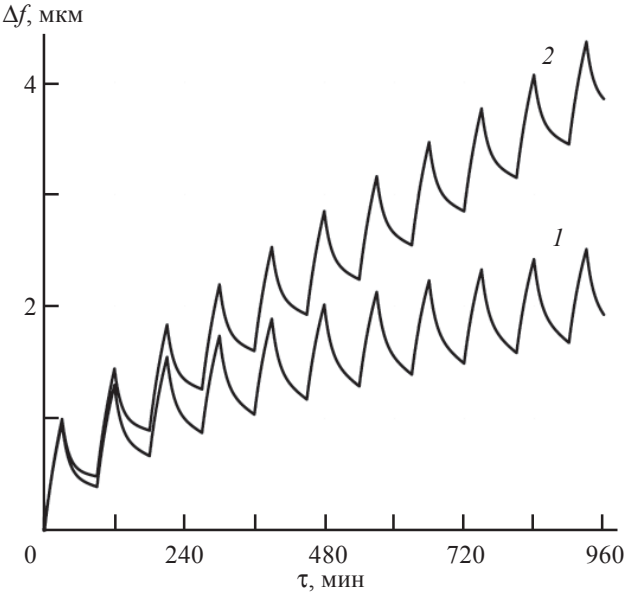


Рис. 4. Зависимости термонаведенного смещения фокуса телескопа-лимбографа СЛ-200 от времени работы в циклическом режиме (30 мин – наблюдение за Солнцем, 60 мин – перерыв) при коэффициенте линейного расширения инварового корпуса $1{,}9\times10^{-6}$ K^{-1} (*1*) и $0{,}5\times10^{-6}$ K^{-1} (*2*).

дается почти монотонный рост перегрева. Максимальный перегрев невелик – около 0,06 K. Однако при увеличении массы вторичного зеркала за счет выбора большей толщины можно уменьшить размах колебаний его температуры в несколько раз.

На рис. 4 представлены результаты расчета по формуле (4) с учетом данных рис. 3 колебаний величины термонаведенного смещения фокуса. Линия *2* соответствует случаю использования в качестве материала корпуса инвара специальной марки с особо низким коэффициентом линейного расширения. Из данных этого рисунка можно сделать следующие выводы: во-первых, использование инвара с низким коэффициентом линейного расширения нецелесообразно; во-вторых, телескоп весьма термоустойчив применительно к данному режиму работы при выбранных параметрах тепловой схемы.

В заключение по известным формулам [8] были проведены исследования максимально возможных термодеформаций главного зеркала СЛ-200. Максимальный осевой температурный перепад $\Delta\vartheta_l$ не может превысить величины

$$\Delta\vartheta_l = \frac{q_\text{г} l}{\lambda},\ \ q_\text{г} = \chi_\text{г} tE = 0{,}14\ \text{Вт/м}^2, \qquad (13)$$

где l – толщина зеркала.

Максимальное смещение профиля главного зеркала на краю относительно начального положения составит

$$U_x = -\frac{\alpha_\text{г} q_\text{г} r^2}{2\lambda}, \qquad (14)$$

где r – наружный радиус зеркала.

Таблица 2. Максимальные значения температурных перепадов, искажений профиля на краю и приращений фокуса для главного зеркала из карбида кремния

$\Delta\vartheta_l$, K	U_x, мкм	$\Delta f_\text{г}$, мкм
$1{,}5\times10^{-5}$	$0{,}83\times10^{-5}$	4×10^{-4}

Предельно возможное термически наведенное приращение фокуса главного зеркала

$$\Delta f_\text{г} = \frac{\alpha_\text{г} q_\text{г} R_\text{п}}{4\lambda} f_\text{г}. \qquad (15)$$

Примем значения геометрических параметров $r = 100$ мм, $l = 20$ мм, $f_\text{г} = 680$ мм. Результаты расчетов искомых величин по формулам (13)–(15) для карбида кремния ($\lambda = 185$ Вт/м K) [9] приведены в табл. 2.

Из таблицы видно, что при поглощении поверхностью зеркала из карбида кремния 1% падающего потока излучения в принципе не может развиться сколь-нибудь заметный осевой градиент температур, который бы мог хоть как-то повлиять на искажение профиля и величину параксиального фокуса.

Искажения, создаваемые радиальным градиентом температур, менее опасны. Если бы тыльная сторона поверхности главного зеркала была бы теплоизолирована, а весь поглощаемый тепловой поток отводился бы в радиальном направлении, то в этом случае предельное приращение фокуса зеркала не могло бы превысить величины, определяемой соотношением [6]

$$\Delta f_\text{г} = \frac{1+\nu}{16}\frac{\alpha_\text{г} q_\text{г} r^2}{\lambda l} = 0{,}7\times10^{-4}\ \text{мкм}, \qquad (16)$$

где ν – коэффициент Пуассона.

Как видно из (16), для зеркала из карбида кремния термическое смещение фокуса составляет ничтожную величину и практически не может быть замечено. Максимальное искажение профиля зеркал не превышает $\sim 10^{-5}$ мкм, что вполне удовлетворяет допуску $\Lambda/50$.

Таким образом, тепломеханическая структура конструкции лимбографа СЛ-200, выполненная на основе инварового корпуса, карбидокремниевых главного и вторичного зеркал, теплозащитных крышек и системы термостатирования фокального и важнейших оптико-механических узлов, а также использование кварцевого светофильтра на входном зрачке и “луны” в промежуточном фокусе позволят обеспечить устойчивое высокое качество изображения оптики и другие сквозные характеристики оптико-приемного блока лимбографа в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абдусаматов Х.И.* Скоординированные вариации диаметра, активности и светимости Солнца и эксперимент "Измерения временных вариаций формы и диаметра Солнца" на борту Российского сегмента МКС // Петербургские фрагменты научной картины мира. 2003. В. 2. С. 8–20.
2. *Abdussamatov H.I., Arkhipova L.N., Alekseev Yu.V. et al.* The project "Astrometry" to measurement of temporary variations of the shape and the diameter of the Sun on the Russian segment of the ISS // IAU Symp. 223. Book of abstracts. St. Petersburg, 2004. P. 4–5.
3. *Абдусаматов Х.И.* Оптический солнечный телескоп // Патент РФ на изобретение № 2158946. Бюл. изобр. 2000. № 31. С. 383.
4. *Погодин Г.И., Трунева Е.В., Ханков С.И.* Расчет термооптических аберраций фокусирующих зеркал // ОМП. 1984. № 6. С. 20–24.
5. *Трунева Е.В., Ханков С.И.* Термооптические аберрации зеркал с центральным отверстием // ОМП. 1986. № 6. С. 8–11.
6. *Ханков С.И.* Расчет влияния направления и интенсивности теплоотвода на термооптические аберрации фокусирующих зеркал // ОМП. 1986. № 7. С. 21–24.
7. *Захарченко И.И., Ханков С.И.* Расчет термооптических аберраций зеркального телескопа, вызванных различием температур его элементов // Изв. вузов. Приборостроение. 1989. Т. 32. № 2. С. 49–54.
8. *Байкова Н.О., Ханков С.И.* Алгоритм и аналитическая методика расчета термонаведенных аберраций зеркал // ИФЖ. 1994. Т. 66. № 1. С. 69–75.
9. *Якушенков Ю.Г.* Теория и расчет оптико-электронных приборов. М.: Машиностроение, 1989. 360 с.