

ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 621.373.526

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТИ СОЛНЕЧНОГО ЛИМБОГРАФА ПРИ ЕГО РАБОТЕ В РЕЖИМЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ЗВЕЗДАМИ НА БОРТУ РОССИЙСКОГО СЕГМЕНТА МКС

© 2007 г. **Х. И. Абдусаматов**, доктор физ.-мат. наук; **С. И. Ханков**, доктор техн. наук

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория, Санкт-Петербург

Проведены теоретические исследования солнечного лимбографа СЛ-200 при его работе на борту российского сегмента МКС в режиме наблюдения за звездами. Показано, что за 60 мин теплоотдача излучением в холодный космос не приводит к существенным термоабберациям его оптической системы, что обеспечивает устойчивое высокое качество как изображения, так и сквозных характеристик лимбографа в целом.

Коды OCIS: 080.1010, 110.3000, 120.4570, 120.0280, 350.1260, 350.6050.

Поступила в редакцию 22.06.2006.

Проведенные нами ранее расчетно-теоретические исследования термостабильности солнечного лимбографа СЛ-200 показали, что при его работе в режиме наблюдения за Солнцем разработанная тепломеханическая схема конструкции лимбографа позволяет обеспечить устойчивое высокое качество изображения оптики [1, 2].

В соответствии с проектом “Астрономия” на борту служебного модуля российского сегмента (РС) МКС будут проводиться измерения временных вариаций формы лимба и диаметра диска Солнца с точностью порядка 0,005". Для редукции результатов измерений из инструментальной системы в метрическую, а также для контроля стабильности всей инструментальной системы планируется регулярно проводить измерения таких характеристик, как масштабы (по обеим осям измерительной системы), косоугольность системы координат (отличие угла между осями системы от 90°) и ориентацию осей относительно направления на полюс экваториальной системы координат. Эти задачи – калибровка масштаба изображения и контроль стабильности функциональных параметров лимбографа в целом – будут решены посредством периодического измерения угловых расстояний между яркими эталонными звездами каталога Хиппаркос [3]. Поэтому не менее важно, чтобы качество изображения лимбографа сохранялось и при его работе в режиме ориентации по звездам, когда защитный светофильтр отодвигается из поля зрения оптической системы, которая в результате охлаждается за счет теп-

лоотдачи излучением в холодное космическое пространство.

Критерием термостабильности солнечного лимбографа СЛ-200 при его работе в любом режиме может служить допустимое смещение фокальной плоскости $\Delta f \leq 26$ мкм [1], которое для данного конкретного телескопа с заданными геометрическими параметрами, с корпусом из инвара и зеркалами из карбида кремния может быть рассчитано по формуле [1]

$$\Delta f = 79,2\vartheta_{\Gamma} - 74,1\vartheta_{\kappa} + 15,8\vartheta_{\text{в}}, \quad \vartheta_i = T_i - T_0, \quad (1)$$

где T_i – температура i -го элемента телескопа, T_0 – начальная температура ($T_0 = 263$ К), ϑ_i – перегрев i -го элемента относительно начального значения (при охлаждении элементов телескопа в открытый космос $\vartheta_i < 0$); индексы Γ , κ и в означают соответственно главное (приемное) зеркало, инваровый корпус и вторичное (эллипсоидальное) зеркало.

Оптическая схема солнечного лимбографа СЛ-200 и все его параметры описаны в [1, 4]. Там же представлена математическая модель нестационарного теплового баланса системы трех тел (главное зеркало, вторичное зеркало и корпус лимбографа) в режиме наблюдения за Солнцем.

В рассматриваемом здесь случае математическая модель описывается сходной системой трех дифференциальных уравнений первого порядка, однако вместо постоянных свободных членов, задающих величины поглощаемых потоков солнечного излучения, теперь уравнения дополняются слагаемыми, учитывающими лучистую теплоотдачу в космос:

$$\left. \begin{aligned} C_{\Gamma} \frac{dT_{\Gamma}}{d\tau} + \sigma_{\Gamma\kappa} (T_{\Gamma} - T_{\kappa}) + \varepsilon_{\Gamma\Pi} \sigma_0 S_{\Gamma} \left(\frac{T_{\Gamma}}{100} \right)^4 &= 0, \\ C_{\text{В}} \frac{dT_{\text{В}}}{d\tau} + \sigma_{\text{В}\kappa} (T_{\text{В}} - T_{\kappa}) + \varepsilon_{\text{В}\Pi} \sigma_0 S_{\text{В}} \left(\frac{T_{\text{В}}}{100} \right)^4 &= 0, \\ C_{\kappa} \frac{dT_{\kappa}}{d\tau} + \sigma_{\Gamma\kappa} (T_{\kappa} - T_{\Gamma}) + \sigma_{\text{В}\kappa} (T_{\kappa} - T_{\text{В}}) + \varepsilon_{\kappa\Pi} \sigma_0 S_{\kappa} \left(\frac{T_{\kappa}}{100} \right)^4 &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где T_i – температура i -го элемента лимбографа, τ – текущее время, C_i – полная теплоемкость i -го элемента, σ_{ij} – тепловая проводимость между элементами i и j , $\varepsilon_{i\Pi}$ – приведенная степень черноты i -го элемента, включающая информацию о степени черноты поверхностей и коэффициенте облученности $\sigma_0 = 5,67 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}^4$ – приведенная постоянная Стефана–Больцмана, S_i – площадь излучающей поверхности для i -го элемента.

Начальные условия для системы уравнений (2) соответствуют принятым ранее [1]:

$$T_{\Gamma}(\tau = 0) = T_{\text{В}}(\tau = 0) = T_{\kappa}(\tau = 0) = T_0 = 263 \text{ К}. \quad (3)$$

Значения параметров, входящих в уравнения системы (2), представлены в табл. 1.

Тепловые проводимости $\sigma_{\Gamma\kappa}$ и $\sigma_{\text{В}\kappa}$ определяются кондуктивными связями, лучистые компоненты этих проводимостей незначительны. Тепловая проводимость между главным и вторичным зеркалами равна нулю. Площадь излучающей поверхности полости корпуса объектива принималась для оценки понижения температуры по максимуму как результат интегрирования по всей внутренней поверхности без учета затенения элементами крепления вторичного зеркала и фрагментами корпуса МКС. Приведенные степени черноты для каждого из элементов рассчитывались по известным методикам [5, 6].

Разделим каждое из уравнений системы (2) на соответствующие значения полных теплоемкостей и введем следующие обозначения:

$$\left. \begin{aligned} m_{\Gamma\kappa} &= \frac{\sigma_{\Gamma\kappa}}{C_{\Gamma}}, \quad m_{\text{В}\kappa} = \frac{\sigma_{\text{В}\kappa}}{C_{\text{В}}}, \quad m_{\kappa\Gamma} = \frac{\sigma_{\Gamma\kappa}}{C_{\kappa}}, \quad m_{\kappa\text{В}} = \frac{\sigma_{\text{В}\kappa}}{C_{\kappa}}, \\ m_{\Gamma} &= \frac{\varepsilon_{\Gamma\Pi} \sigma_0 S_{\Gamma}}{100 C_{\Gamma}} \left(\frac{T_{\Gamma}}{100} \right)^3, \quad m_{\text{В}} = \frac{\varepsilon_{\text{В}\Pi} \sigma_0 S_{\text{В}}}{100 C_{\text{В}}} \left(\frac{T_{\text{В}}}{100} \right)^3, \quad m_{\kappa} = \frac{\varepsilon_{\kappa\Pi} \sigma_0 S_{\kappa}}{100 C_{\kappa}} \left(\frac{T_{\kappa}}{100} \right)^3. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

С учетом обозначений (4) система уравнений (2) может быть представлена в виде

$$\left. \begin{aligned} \frac{dT_{\Gamma}}{d\tau} + m_{\Gamma\kappa} (T_{\Gamma} - T_{\kappa}) + m_{\Gamma} T_{\Gamma} &= 0, \\ \frac{dT_{\text{В}}}{d\tau} + m_{\text{В}\kappa} (T_{\text{В}} - T_{\kappa}) + m_{\text{В}} T_{\text{В}} &= 0, \\ \frac{dT_{\kappa}}{d\tau} + m_{\kappa\Gamma} (T_{\kappa} - T_{\Gamma}) + m_{\kappa\text{В}} (T_{\kappa} - T_{\text{В}}) + m_{\kappa} T_{\kappa} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Параметры m_{ij} и m_n ($n = \Gamma, \text{В}, \kappa$) имеют размерность темпов охлаждения [5] и измеряются в с^{-1} или мин^{-1} , их значения представлены в табл. 2.

При расчете величин m_{Γ} , $m_{\text{В}}$ и m_{κ} принято постоянное значение температур из (3).

Из табл. 2 видно, что величины m_{Γ} , $m_{\text{В}}$ и m_{κ} на три порядка меньше значений $m_{\Gamma\kappa}$, $m_{\text{В}\kappa}$, $m_{\kappa\Gamma}$ и $m_{\kappa\text{В}}$. Это означает, что тепловая связь между элементами значительно больше, чем между телескопом в целом и холодным космосом. На основе анализа табл. 2 заранее можно утверждать, что, во-первых, вторичное зеркало и корпус в процессе охлаждения будут иметь близкие температуры, а во-вторых, что снижение температуры главного зеркала будет отставать от уменьшения температур остальных элементов.

Таблица 1. Значения параметров, входящих в систему уравнений (2)

Полные теплоемкости, Дж/К			Тепловые проводимости, Вт/К		Приведенные степени черноты, $\varepsilon \times 10^4$			Площади излучающих поверхностей, $S \times 10^{-2}$, м ²		
C_{Γ}	$C_{\text{В}}$	C_{κ}	$\sigma_{\Gamma\kappa}$	$\sigma_{\text{В}\kappa}$	$\varepsilon_{\Gamma\Pi}$	$\varepsilon_{\text{В}\Pi}$	$\varepsilon_{\kappa\Pi}$	S_{Γ}	$S_{\text{В}}$	S_{κ}
1100	20	1000	0,044	0,015	5,2	40	100	3,14	0,15	3,14

Таблица 2. Значения параметров в уравнениях системы (5) (размерность [мин⁻¹])

$m_{гк} \times 10^3$	$m_{вк} \times 10^3$	$m_{кг} \times 10^3$	$m_{кв} \times 10^3$	$m_{г} \times 10^6$	$m_{в} \times 10^6$	$m_{к} \times 10^6$
2,4	45	2,64	0,9	0,91	18,6	19,5

Таблица 3. Значения параметров $b_i \times 10^4$

$b_{г}$	$b_{в}$	$b_{к}$
0,05	1,02	1,07

Первое утверждение вытекает из того факта, что $m_{вк}$ на порядок больше, чем $m_{гк}$, $m_{кг}$ и $m_{кв}$. Второе утверждение основано на том, что $m_{г}$ на порядок меньше, чем $m_{в}$ и $m_{к}$.

Таким образом, на основе предварительного анализа данных табл. 2 можно ожидать медленного и достаточно равномерного охлаждения телескопа. При этом развитие термоаббераций телескопа будет определяться главным образом отставанием по скорости охлаждения главного зеркала.

Для проведения практических расчетов необходимо привести систему уравнений (5) к виду:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dT_{г}}{d\tau} + m_{гк}(T_{г} - T_{к}) + b_{г} \left(\frac{T_{г}}{100} \right)^4 &= 0, \\ \frac{dT_{в}}{d\tau} + m_{вк}(T_{в} - T_{к}) + b_{в} \left(\frac{T_{в}}{100} \right)^4 &= 0, \\ \frac{dT_{к}}{d\tau} + m_{кг}(T_{к} - T_{г}) + m_{кв}(T_{к} - T_{в}) + b_{к} \left(\frac{T_{к}}{100} \right)^4 &= 0. \end{aligned} \right\} (6)$$

Значения параметров b_i , имеющих размерность [мин⁻¹ K⁻³], представлены в табл. 3.

Система (6) решалась численно.

На рис. 1 представлены зависимости перегревов элементов лимбографа от времени в течение 60-минутного цикла наблюдения. Температура главного зеркала начинает сколько-нибудь заметно снижаться только после часовой работы в режиме наблюдения за звездами, в то время как отрицательные перегревы корпуса и вторичного зеркала к концу цикла достигают значения -0,3 К.

На рис. 2 представлена зависимость термонаведенного смещения фокальной плоскости от времени, вычисленная с использованием данных рис. 1 по формуле (1). Как видно из этого рисунка, в конце цикла $\Delta f_1 < 17$ мкм при допустимом значении 26 мкм [1].

На рис. 3 представлена зависимость термонаведенной поперечной сферической абберации от времени, вычисленная по формуле [1]:

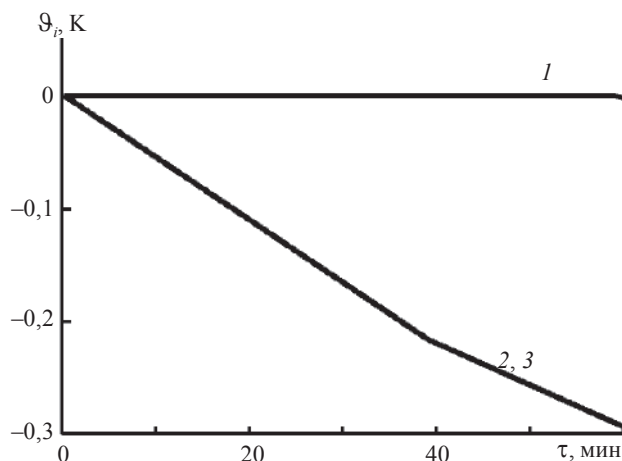


Рис. 1. Зависимости отрицательных перегревов оптических элементов от времени. 1 – главное зеркало, 2 – вторичное зеркало, 3 – корпус солнечного лимбографа СЛ-200.

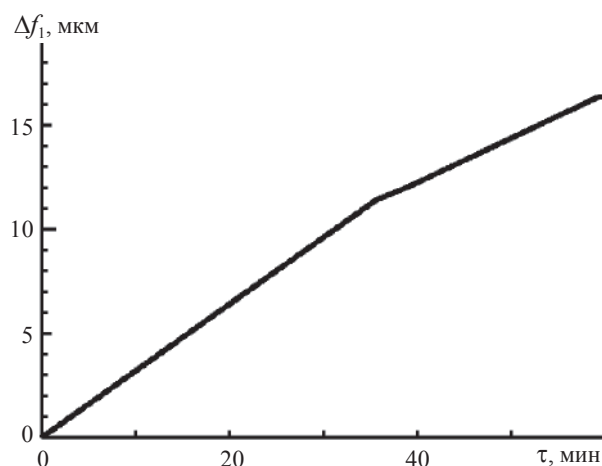


Рис. 2. Зависимость термонаведенного смещения фокальной плоскости солнечного лимбографа СЛ-200 от времени.

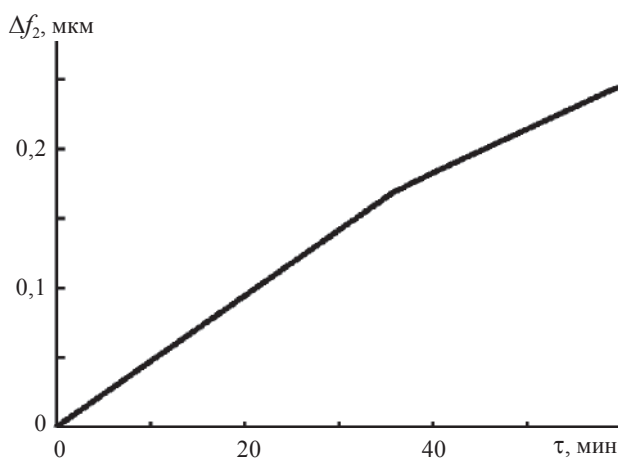


Рис. 3. Зависимость термонаведенной сферической абберации солнечного лимбографа СЛ-200 от времени.

$$\Delta f_2 = 0,775\vartheta_r - 0,772\vartheta_k + 0,137\vartheta_b. \quad (7)$$

При начальном диаметре дифракционного кружка рассеяния 34 мкм [1] термонаведенная сферическая аберрация в конце цикла наблюдения незначительна и составляет примерно 0,25 мкм.

Таким образом, проведенные исследования показали высокую термостабильность выбранной тепломеханической схемы солнечного лимбографа СЛ-200 при его работе в режиме наблюдения за звездами в течение 60 мин на борту РС МКС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдусаматов Х.И., Ханков С.И. Расчет термоаббераций солнечного телескопа-лимбографа космического

базирования // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 1. С. 29–34.

2. Абдусаматов Х.И., Ханков С.И. Термооптические искажения и условия обеспечения термостабильности кварцевого светофильтра на входном зрачке солнечного лимбографа // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 4. С. 37–42.
3. Perryman M.A.C. et al. The Hipparcos and Tycho Catalogues. Noordwijk, ESA. 1997.
4. Абдусаматов Х.И. Мониторинг формы и диаметра Солнца на служебном модуле российского сегмента МКС // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 4. С. 26–32.
5. Дульнев Г.Н., Семяшкин Э.М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. Л.: Энергия, 1968. 360 с.
6. Блох А.Г., Журавлев А.Г., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 432 с.