

УСЛОВИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТИ СОЛНЕЧНОГО ЛИМБОГРАФА СЛ-200 В СТАЦИОНАРНОМ ТЕПЛОВОМ РЕЖИМЕ

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

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург

В результате проведенного теоретического анализа показана возможность обеспечения термостабильности солнечного лимбографа СЛ-200 в стационарном тепловом режиме, реализуемом на солнечно-постоянной орбите, за счет соответствующего выбора параметров покрытий кварцевого светофильтра, ослабляющего мощность потока солнечного излучения.

Коды OCIS: 080.1010, 110.3000, 120.4570, 120.4640, 120.4820, 120.0280, 350.1260, 350.6050, 350.6090.

Поступила в редакцию 14.12.2006.

Результаты предыдущих исследований термоаббераций солнечного лимбографа СЛ-200 доказали возможность обеспечения его термостабильности при ограниченных по времени сеансах наблюдения за Солнцем с борта служебного модуля российского сегмента МКС [1, 2]. Очередной важной задачей следует считать определение возможностей длительных непрерывных наблюдений изменения формы лимба и диаметра диска Солнца, а также тонкой структуры его фотосферы с помощью СЛ-200 на борту беспилотного автоматического космического аппарата, движущегося по солнечно-синхронной орбите, в стационарном тепловом режиме.

Светоспектроразделительный фильтр на входном зрачке оптической системы СЛ-200 является одним из главных элементов автономной системы обеспечения теплового режима (АСОТР), обеспечивающим высокое качество изображения лимбографа [1], однако только при обеспечении определенных условий равенства температур светофильтра и телескопа [2]. В противном случае светофильтр может оказаться основным источником тепловых возмущений, создающим высокие термоабберации лимбографа, а в самом светофильтре будут существенно возрастать температурные неоднородности, в том числе в результате теплового влияния телескопа, приводящие к его значительным термодформациям. Поэтому важно определить требования к характеристикам покрытий обеих поверхностей кварцевого светофильтра на входном зрачке лимбографа, ослабляющего мощность светового потока солнечного излучения более чем в 100 раз.

Необходимым этапом исследований термоаббераций объектива и светофильтра с учетом возможностей их компенсации с использованием АСОТР, включающей источник тепловой мощности до 100 Вт и систему радиационных панелей, является анализ стационарного теплового режима системы тел, включающей светофильтр, объектив, тепловые мосты

между объективом и радиационной панелью, радиационные панели, а также размещенный вдоль трубы объектива источник тепловой мощности.

Решать задачу с самого начала в полной и общей постановке (расчет температурных полей в каждом теле системы) затруднительно. Используя принцип поэтапного моделирования [3], следует вначале исследовать среднеобъемные температуры каждого из элементов системы. Только после этого для каждого элемента возможно формирование граничных условий на поверхностях элементов с последующим детальным расчетом. При этом на первом этапе объектив, состоящий из корпуса и двух зеркал, рассматривается как единое тело, что оправдано малыми перепадами температур (менее 0,5 К) между зеркалами и корпусом [1], тогда как между объективом, светофильтром и радиационными панелями в общем случае возможны более существенные различия по уровням температур.

Важно с самого начала определить роль в тепловом балансе тепловых мостов (крепежных элементов), соединяющих трубу объектива с радиационной панелью. Идеальная система радиационного сброса тепловой энергии должна обеспечивать существенное превышение тепловой проводимости мостов над тепловой проводимостью радиационного теплоотвода.

Суммарная тепловая мощность P_p , уходящая от объектива через тепловой мост и далее через радиационную панель в открытый космос, определяется из соотношения

$$P_p = (T_1 - T_p) \sigma_{1p} = \varepsilon_p S_p \sigma_0 \left(\frac{T_p}{100} \right)^4, \quad (1)$$

где T_1 – температура объектива, T_p – температура рабочей поверхности радиационной панели, σ_{1p} – тепловая проводимость моста между объективом и радиационной панелью, ε_p – степень черноты поверхности радиационной панели, S_p – площадь из-

лучающей поверхности радиационной панели, $\sigma_0 = 5,67 \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$ – приведенная постоянная Стефана–Больцмана.

Представим величину σ_{lp} в виде:

$$\sigma_{lp} = \alpha_m S_m, \quad \alpha_m = \frac{\lambda_m}{l}, \quad (2)$$

где α_m – коэффициент теплопередачи моста, S_m – средняя площадь поперечного сечения моста, λ_m – коэффициент теплопроводности материала моста, l – длина моста.

Примем допущение, что поверхность радиационной панели абсолютно черная, т. е. $\epsilon_p = 1$, и представим соотношение (1) в виде

$$\left(\frac{T_p}{100}\right)^4 = A(T_1 - T_p), \quad A = \frac{\sigma_{lp}}{S_p \sigma_0} = \frac{\alpha_m}{\sigma_0} n, \quad n = \frac{S_m}{S_p}. \quad (3)$$

Для моста из дюралюминия $\lambda_m = 160 \text{ Вт/мК}$, и при $l = 0,07 \text{ м}$ получим $\alpha_m = 2300 \text{ Вт/м}^2\text{К}$. Подставив это значение, а также $\sigma_0 = 5,67 \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$ в (3), при заданной $T_1 = 263 \text{ К}$ [1] получим уравнение

$$\left(\frac{T_p}{100}\right)^4 = 406n(263 - T_p). \quad (4)$$

Из анализа (4) следует:

$$T_1 - T_p = 263 - T_p < 0,5 \text{ К при } n > 0,2. \quad (5)$$

Таким образом, при $S_m > 0,2S_p$ тепловую проводимость моста можно считать бесконечно большой, а температуру радиационной панели – равной температуре корпуса объектива (трубы), т. е. $T_p = T_1$.

Предельная снимаемая тепловая мощность при термостабилизации объектива на уровне $T_1 = 263 \text{ К}$ и при $S_p = 0,25 \text{ м}^2$ составит

$$P_p = 67,8 \text{ Вт}. \quad (6)$$

С учетом полученных выводов рассматриваемая система тел может быть сведена к двум телам – объективу и светофильтру. В этом случае стационарный тепловой баланс описывается системой двух алгебраических уравнений

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{n1} S \sigma_0 \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right] + S_p \sigma_0 \left(\frac{T_1}{100}\right)^4 &= P_1 + P, \\ \epsilon_{n2} S \sigma_0 \left[\left(\frac{T_2}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_1}{100}\right)^4 \right] + \epsilon_n S \sigma_0 \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 &= P_2, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\epsilon_{n1} = \left[\frac{1}{\epsilon_1} + \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right) \Phi_{21} \right]^{-1}, \quad \Phi_{21} = \frac{S_1}{S_2} = \frac{S_1}{S},$$

$$\epsilon_{n2} = \left[\frac{1}{\epsilon_1} + \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right) \right]^{-1},$$

где ϵ_{ni} – приведенные степени черноты, Φ_{21} – коэффициент облученности светофильтра полостью объектива, S – площадь входного зрачка, S_1 – площадь поверхности полости объектива, облучающей внутреннюю поверхность светофильтра, S_2 – площадь торцевой поверхности светофильтра, T_2 – температура светофильтра, ϵ_n – степень черноты наружной поверхности светофильтра, P – мощность источника тепловыделений, P_1 и P_2 – мощности потока излучения, поглощенного главным зеркалом телескопа и светофильтром соответственно.

Все остальные обозначения соответствуют принятым в [1] и [2], там же заданы все значения исходных параметров.

Зададим требования равенства температуры объектива и светофильтра, что обеспечит минимальные термоискажения и того и другого, т. е.

$$T_1 = T_2 = T. \quad (8)$$

При условии (8) разности в квадратных скобках левых частей уравнений (7) равны нулю, откуда следует новая система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{T}{100}\right)^4 &= A_1 + A_2, \quad (a) \\ \left(\frac{T}{100}\right)^4 &= A_3. \quad (b) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Из (9) вытекает равенство

$$A_1 + A_2 = A_3, \quad (10)$$

где

$$A_1 = \frac{P_1}{S_p \sigma_0}, \quad A_2 = \frac{P}{S_p \sigma_0}, \quad A_3 = \frac{P_2}{\epsilon_n S \sigma_0}. \quad (11)$$

Из (10) с учетом (11) вытекает новое соотношение:

$$P = \frac{S_p}{\epsilon_n S} P_2 - P_1, \quad (12)$$

где $S = 3,14 \times 10^{-2} \text{ м}^2$ [1, 2], $S_p = 0,25 \text{ м}^2$.

Тепловой поток P_1 , поглощаемый главным зеркалом, с учетом поглощаемого светофильтром солнечного излучения может быть представлен в виде

$$P_1 = \aleph_r S [(1 - R_1)E - q_\Sigma] (1 - R_2), \quad (13)$$

где R_1 и R_2 – коэффициенты отражения соответственно наружной (обращенной к Солнцу) и внутренней (обращенной к объективу) поверхностей светофильтра, $E = 1400 \text{ Вт/м}^2$ – солнечная постоянная, $\aleph_r$ – коэффициент поглощения поверхности главного зеркала, q_Σ – удельная мощность поглощаемого светофильтром солнечного излучения.

Тепловой поток P_2 определяется из простого соотношения

$$P_2 = q_\Sigma S. \quad (14)$$

Удельная тепловая мощность поглощенного светофильтром излучения состоит из трех компонентов:

$$q_\Sigma = q_1 + q_2 + Q, \quad (15)$$

где q_1 и q_2 – удельная тепловая мощность или поверхностная плотность теплового потока, поглощенного соответственно наружной и внутренней поверхностями светофильтра, а Q – осредненная по толщине светофильтра поверхностная плотность теплового потока, поглощенного его объемом при многократном переотражении излучения покрытиями на поверхностях светофильтра.

Указанные тепловые потоки с учетом данных работы [2] могут быть представлены в наиболее удобном для расчета виде:

$$q_1 = (1 - R_1) E \aleph_1 \left[1 + (1 - \aleph_1) \frac{R_2 \exp(-2D)}{1 - R_1 R_2 \exp(-2D)} \right], \quad (16)$$

$$q_2 = (1 - R_1) E (1 - \aleph_1) \aleph_2 \frac{\exp(-D)}{1 - R_1 R_2 \exp(-2D)}, \quad (17)$$

$$Q = (1 - R_1) E \times \frac{1 - \exp(-D)}{1 - R_1 R_2 \exp(-D)} \left[\frac{1 + \exp(-D)}{2} + R_2 \exp(-D) \right], \quad (18)$$

где $\aleph_1$ и $\aleph_2$ – коэффициенты поглощения наружной и внутренней поверхностей соответственно, D – оптическая плотность кварцевого светофильтра.

Приняв постоянными значения параметров [2]: $\aleph_1 = 0,01$, $\aleph_2 = 0,01$, $D = 0,02$, $R_2 = 0,9$, вместо (16)–(18) получим:

$$q_1 = 14(1 - R_1) \frac{1 + 0,865(0,99 - R_1)}{1 - 0,865R_1}, \quad (19)$$

$$q_2 = 13,6(1 - R_1) \frac{1}{1 - 0,865R_1}, \quad (20)$$

$$Q = 52,4(1 - R_1) \frac{1}{1 - 0,882R_1}. \quad (21)$$

Вычисленные по формулам (19)–(21) зависимости q_1 , q_2 , Q и q_Σ от коэффициента отражения покрытия на наружной поверхности светофильтра R_1 представлены на рис. 1. Как видно из данных рис. 1, при увеличении коэффициента отражения R_1 от 0,9 до 0,99 величина q_Σ уменьшается от 38,5 до 6 Вт, т. е. практически в 6,5 раз.

С использованием значений q_Σ из рис. 1 по формулам (13) и (14) были вычислены зависимости $P_1(R_1)$ и $P_2(R_1)$, которые представлены на рис. 2.

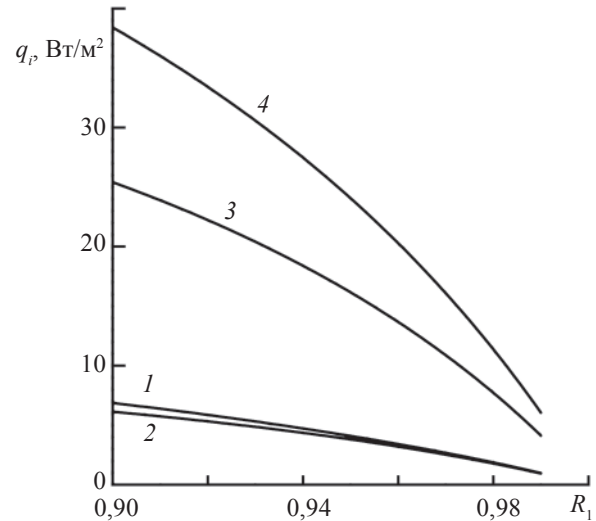


Рис. 1. Зависимости удельной мощности поглощенных тепловых потоков от коэффициента отражения покрытия на наружной поверхности светофильтра. 1 – q_1 , 2 – q_2 , 3 – Q , 4 – q_Σ .

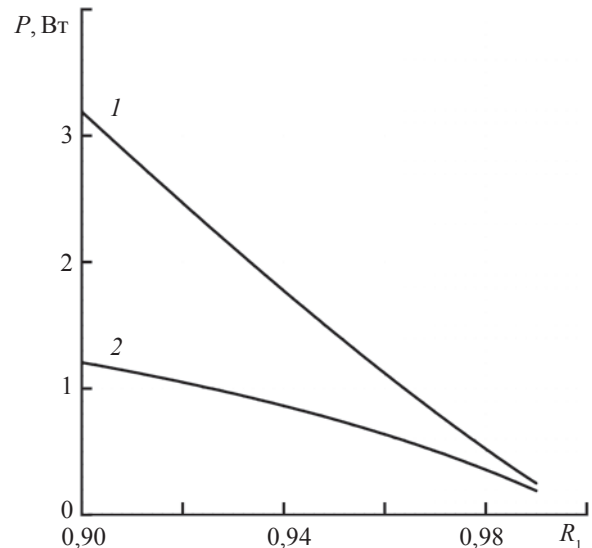


Рис. 2. Зависимости мощности тепловых потоков P_1 и P_2 , поглощенных полостью оптической системы и светофильтром соответственно, от коэффициента отражения R_1 наружной поверхности светофильтра. 1 – $P_1 \times 10^3$, 2 – P_2 .

Видно, что при $R_1 = 0,9$ значение P_1 примерно в 300 раз меньше, чем P_2 , а при $R_1 = 0,99$ – в 1000 раз.

С учетом малого значения P_1 по сравнению с P_2 , подставив (14) в (12), можно получить расчетную формулу

$$P = S_p \frac{q_\Sigma}{\epsilon_n}. \quad (22)$$

Приняв $S_p = 0,25 \text{ м}^2$ и используя зависимость $q_\Sigma(R_1)$ на рис. 1, можно построить зависимости $P(\epsilon_n)$,

которые представлены на рис. 3 для трех значений коэффициента отражения R_1 . Как видно из этого рисунка, требуемая мощность нагревателя $P \approx 60\text{--}70$ Вт при $R_1 = 0,9$ соответствует степени черноты $\varepsilon_n = 0,15$, а при $R_1 = 0,99 - \varepsilon_n \approx 0,02$, что гораздо проще обеспечить на практике.

К сожалению, создать и нанести покрытие, отражающее 99% падающего потока солнечного излучения, на практике чрезвычайно трудно. В дальнейших расчетах примем практически реализуемое значение коэффициента отражения $R_1 = 0,95$.

Перейдем к оценкам зависимости температуры изотермической системы объектив–светофильтр от степени черноты наружной поверхности светофильтра при значениях коэффициента отражения R_1 , равных 0,9 и 0,95. Из соотношения (9б) и (11) можно получить следующую формулу:

$$T = 100 \sqrt[4]{\frac{q_\Sigma}{\sigma_0 \varepsilon_n}} = 64,8 \sqrt[4]{\frac{q_\Sigma}{\varepsilon_n}}. \quad (23)$$

Определив из рис. 1 $q_\Sigma|_{R_1=0,9} = 38,5$ Вт/м² и $q_\Sigma|_{R_1=0,95} = 24$ Вт/м², по формуле (23) можно найти значения степени черноты ε_n , (0,15 и 0,088 соответственно), необходимые для поддержания системы на заданном уровне $T \approx 263$ К.

Существует принципиальная возможность понизить требуемое значение ε_n за счет отвода части тепловой мощности P_2 с боковой поверхности светофильтра через радиационную панель с излучающей

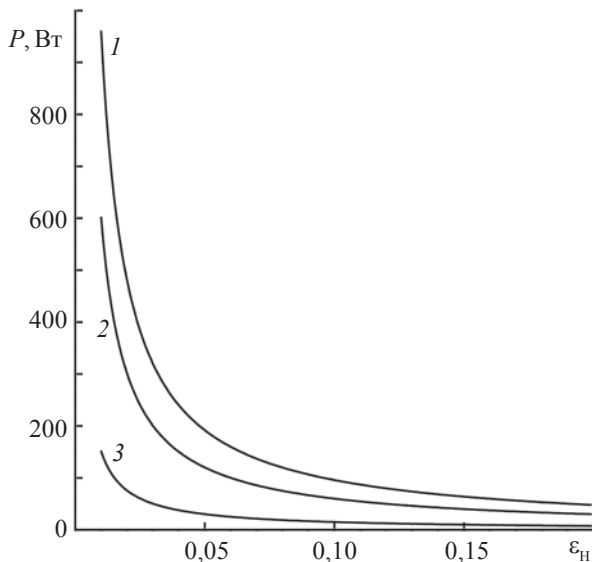


Рис. 3. Зависимость требуемого значения мощности нагревателя P , при котором обеспечивается равенство температур объектива и светофильтра, от степени черноты наружной поверхности светофильтра при разных значениях коэффициента отражения R_1 ; 1 – 0,9, 2 – 0,95, 3 – 0,99.

площадью S_c , тогда тепловой баланс светофильтра опишется соотношением

$$(\varepsilon_n S + S_c) \sigma_0 \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 = P_2. \quad (24)$$

Из (24) можно получить уточненное требование к ε_n при $R_1 = 0,95$ с учетом отвода части теплового потока через радиационную панель:

$$\varepsilon_n = \varepsilon_{n0} - N, \quad \varepsilon_{n0} = \frac{P_2}{\sigma_0 S \left(\frac{T_2}{100} \right)^4} = 0,088, \quad N = \frac{S_c}{S}. \quad (25)$$

Если, например, потребовать, чтобы наружное покрытие светофильтра удовлетворяло условию

$$\varepsilon_n = 1 - R_1 = 0,05, \quad (26)$$

то из соотношения (25) следует

$$N = 0,038, \quad S_c = 1,19 \times 10^{-3} \text{ м}^2. \quad (27)$$

Здесь важно подчеркнуть, что при $N > 0,038$, как следует из (25), светофильтр будет переохлаждаться ниже температуры 263 К. Необходимо отметить, что площадь боковой поверхности светофильтра составляет $S_b = \pi dL = 0,01256$ м², что в 10,5 раз больше требуемой площади теплоотвода S_c (здесь d – диаметр светофильтра, L – его толщина).

Полный тепловой поток, отводимый от светофильтра радиационной панелью, будет равен

$$P_c = q_c S_c = \sigma_0 S_c \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 = 0,317 \text{ Вт}. \quad (28)$$

Отводимый в радиальном направлении поток P_c создаст в светофильтре радиальный температурный перепад [2]

$$\Delta T_r = \frac{q_c r^2}{4\lambda L} = \frac{P_c}{4\pi\lambda L}, \quad (29)$$

где r – радиус светофильтра, λ – коэффициент теплопроводности материала светофильтра (кварца). Приняв значения $r = 0,1$ м, $L = 0,02$ м; $\lambda = 1,2$ Вт/мК [2], получим $\Delta T_r = 1$ К.

Радиационный температурный перепад ΔT_r создаст термонаведенную разность хода лучей между центром и краем светофильтра, определяемую по [2]:

$$\Delta L_r = W L \Delta T_r = 0,2 \text{ мкм}, \quad (30)$$

где $W = 10^{-5} \text{ К}^{-1}$ – главная термооптическая постоянная кварца.

Полученное значение ΔL_r в 19 раз превышает допустимое значение 0,011 мкм, соответствующее допуску $\Lambda/50$, где $\Lambda = 0,546$ мкм – основная длина волны в рабочем диапазоне лимбографа.

Проведенный анализ указывает на недопустимость теплоотвода от светофильтра в радиальном направлении, поэтому единственное направление распространения теплового потока в светофильтре – осевое. Поскольку в данном случае важно, чтобы осевой температурный перепад не выходил за пределы допустимых значений, нельзя ограничиться приближенными оценками. Поэтому необходимо решить задачу о температурном поле с учетом распределения объемных источников тепла в кварцевой пластине в осевом направлении и при реальных поверхностных плотностях тепловыделений на каждой торцевой поверхности пластины.

Осевое стационарное температурное поле в кварцевой пластине (светофильтре) описывается уравнениями следующей краевой задачи [2]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \theta_v(z) &= 0, & (a) \\ \frac{dT}{dz} \Big|_{z=0} &= -Bi_b (T_0 - T) \Big|_{z=0} - \theta_2, & (б) \\ \frac{dT}{dz} \Big|_{z=1} &= -Bi_h T \Big|_{z=1} + \theta_1. & (в) \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

Здесь

$$\left. \begin{aligned} \theta_v &= \frac{Q_v L}{\lambda}, \quad Q_v(z) = (1 - R_1) E \frac{1 - \exp(-D)}{1 - R_1 R_2 \exp(-D)} [R_2 \exp(-D) + \exp(-Dz)], \\ \theta_1 &= \frac{q_1 L}{\lambda}, \quad \theta_2 = \frac{q_2 L}{\lambda}, \quad Bi_b = \frac{\alpha_b L}{\lambda}, \quad Bi_h = \frac{\alpha_h L}{\lambda}, \quad D = kL, \quad z = \frac{x}{L}, \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

где α_b и α_h – соответственно лучистый коэффициент теплоотдачи на внутренней (обращенной к объективу) и наружной поверхностях светофильтра, D – оптическая плотность кварца, k – коэффициент поглощения, z – безразмерная координата, x – текущая координата в осевом направлении; Bi_h и Bi_b – критерии Био.

Решение краевой задачи (31) с учетом структуры θ_v в (32) имеет громоздкий вид, однако соотношение для перепада температур по толщине светофильтра ΔT_L можно представить в достаточно компактном виде:

$$\Delta T_L = T|_{z=0} - T|_{z=1} = \frac{1}{\alpha_m (1 + a_1)} \left\{ \alpha_r Bi_h T_0 + a_1 q_2 - q_1 - \left[1 + (1 - a_1) R_2 \exp(-D) - \frac{Bi_h}{D} \right] Q_0 \right\}, \quad (33)$$

где

$$Q_0 = (1 - R_1) E \frac{1 - \exp(-D)}{1 - R_1 R_2 \exp(-D)}, \quad \alpha_r = \frac{\lambda}{L}, \quad a_1 = \frac{Bi_h}{Bi_b}.$$

Коэффициент теплоотдачи по толщине кварца $\alpha_r = 60 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, оптическая толщина $D = 0,02$.

Ранее было показано [2], что при температуре $T_0 = 263 \text{ К}$ выполняются соотношения

$$Bi_h = 0,017 \varepsilon_h, \quad Bi_b = 0,069 \varepsilon_b, \quad a_1 = 0,246 \frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_b}. \quad (34)$$

Приняв $R_1 = 0,95$ и $R_2 = 0,9$ и подставив все значения параметров в (33), при условии $\varepsilon_h = \varepsilon_b$ получим соотношение

$$\Delta T_L = 3,68 \varepsilon_h - 0,23. \quad (35)$$

Допустимое значение осевого перепада температур, при котором термическая деформация светофильтра не превысит допустимое значение $\Lambda/50$, составляет $\Delta T_T = \pm 0,08 \text{ К}$.

В таблице представлены значения степени черноты наружной поверхности светофильтра в границах их допустимых изменений.

ΔT_L	-0,08	0	+0,08
ε_h	0,041	0,063	0,084

В соответствии с данными рис. 3 при $R_1 = 0,95$ можно обеспечить тепловой режим телескопа и светофильтра при ограничении потребляемой мощности нагревателя до 100 Вт только при $\varepsilon_h > 0,06$. Поэтому допустимый диапазон изменения степени черноты наружной поверхности светофильтра ограничивается значениями $0,06 \leq \varepsilon_h \leq 0,084$.

Таким образом, проведенные исследования показали возможность обеспечения стабильной работы лимбографа в стационарном тепловом режиме.

Изложенная расчетная методика позволяет анализировать условия обеспечения термостабильности лимбографа при вариации ряда параметров в допустимых диапазонах изменения: $0,9 \leq R_1$ и $R_2 \leq 0,95$; $0 \leq S_p \leq 0,25 \text{ м}^2$; $0 \leq P \leq 100 \text{ Вт}$ и $0,06 \leq \varepsilon_h \leq 0,15$.

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. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Методы расчета теплового режима приборов. М.: Радио и связь, 1990. 312 с.
-