

РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 621.373.526

ТЕРМООПТИЧЕСКАЯ АБЕРРАЦИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ В ЗЕРКАЛЬНЫХ ТЕЛЕСКОПАХ

© 2013 г. Ю. В. Баева, аспирантка; Е. В. Лаповок, аспирант; С. И. Ханков, доктор техн. наук
СПбНИУ ИТМО, Санкт-Петербург
E-mail: yul.bayo@yandex.ru

Получено аналитическое описание зависимости термоабберации положения телескопов Грегори и Кессегрена в виде суммы составляющих, вносимых тепловым режимом каждого элемента телескопа. На конкретном примере изложена методика определения допустимых диапазонов изменения температур корпуса телескопа и платформы крепления главного зеркала, в пределах которых обеспечивается термостабильность телескопа в стационарном тепловом режиме.

Ключевые слова: космический телескоп, система обеспечения теплового режима, тепловой режим, термоабберация.

Коды OCIS: 120.4640, 120.0280, 350.1246, 350.6050, 350.6090.

Поступила в редакцию 01.10.2012.

1. Введение

Изменение теплового режима телескопа приводит к развитию термоаббераций разного типа. Среди них следует выделить термонаведенное смещение положения фокальной плоскости, или термоабберацию положения [1]. Ее учет важен, поскольку ее компенсация не всегда возможна. При этом термонаведенная сферическая абберация хотя и неустранима, но всегда много меньше термоабберации положения для длиннофокусных телескопов [2].

Целью данных исследований является получение единого аналитического описания зависимости термоабберации положения от составляющих (компонентов термоаббераций), вносимых тепловым режимом каждого элемента телескопа, и на этой основе решение задачи определения требований к допустимому диапазону изменения температур элементов термостабильного телескопа. Актуальность решения этой задачи определяется необходимостью учета вклада каждого фактора для разработки рекомендаций по методам обеспечения термостабильности телескопа на основе минимизации термоабберации положения.

Для телескопов Грегори и Кессегрена величина термонаведенного смещения фокальной плоскости была определена нами в виде зависимостей от температурных неравномерностей в главном зеркале [3], а также описана через термоабберацию температурного уровня телескопа и термоабберации температурной неоднородности между элементами телескопа [4]. Однако в последнем случае зеркала принимались изотермичными.

2. Общие соотношения для расчетов термоабберации положения

В результате преобразований аналитических формул получено единое аналитическое описание термоабберации положения, включающее термоабберацию температурной неравномерности в главном зеркале, компоненты термоаббераций температурной неоднородности, в которой температурный уровень главного зеркала задается его минимальной температурой, а термоабберация температурного уровня определяется перегревом корпуса телескопа. Эта аналитическая зависимость имеет вид

$$\begin{aligned} \Delta f &= B_m \Omega_j \Delta \vartheta_j + B_m \Delta \vartheta_i + B_s \Delta \vartheta_s + D \vartheta_t, \\ & i = 1, 2, j = x, r, \\ \Omega_x &= 1 + n, n = R_m/b, \Omega_r = (1 + \nu)/4, \\ D &= B_m + B_s - B_t, \Delta \vartheta_s = \vartheta_s - \vartheta_t, \\ \vartheta_s &= T_s - T_0, \vartheta_s = T_s - T_0, \vartheta_t = T_t - T_0, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\Delta \vartheta_i$ – разность минимальной температуры главного зеркала и температуры корпуса телескопа, $\Delta \vartheta_j$ – перепад температур в главном зеркале, $\Delta \vartheta_s$ – перегрев вторичного зеркала относительно корпуса телескопа, ϑ_s и ϑ_t – соответственно перегревы вторичного зеркала и корпуса телескопа относительно начальной (номинальной) температуры T_0 ; T_s и T_t – соответственно температуры вторичного зеркала и корпуса, R_m – параксиальный радиус главного зеркала, b – толщина зеркала (для длиннофокусного зеркала ввиду малой стрелы прогиба принимается среднее значение толщины), ν – коэффициент Пуассона материала главного зеркала, индексы m и s означают главное и вторичное зеркало соответственно, t – корпус, r и x – цилиндрические координаты.

Коэффициенты B_i [м/К] определяются по формулам

$$\begin{aligned} B_m &= \alpha_m \frac{R_m}{2} c^2, B_s = \alpha_s 2ac, \\ B_t &= \alpha_t Lc^2, c = (1 + e)/(1 - e), \end{aligned} \quad (2)$$

где L – расстояние между зеркалами, a – большая полуось эллипса (для рабочей поверхности вторичного зеркала в телескопе Грегори) или гиперболы (в телескопе Кесегрена), e – эксцентриситет эллипса или гиперболы в уравнении профиля поверхности вторичного зеркала, α_i – коэффициент линейного расширения i -го элемента.

При теплоотводе от тыльной поверхности главного зеркала возникает перепад температур по толщине зеркала. Эту ситуацию будем кратко описывать терминами “осевой теплоотвод” и “осевой температурный перепад”. При этом в формуле (1) реализуются условия $i = 1, j = x$. В результате получим

$$\begin{aligned} \Delta \vartheta_1 &= \vartheta_x - \vartheta_t = q_x/k_x - \vartheta_t, \\ \Delta \vartheta_x &= \vartheta_m - \vartheta_x = q_x b/\lambda, \end{aligned} \quad (3)$$

где ϑ_x – перегрев тыльной поверхности зеркала относительно корпуса телескопа (минимальный перегрев); $\Delta \vartheta_x$ – перепад температур по толщине главного зеркала; ϑ_m – среднеповерхностный перегрев рабочей поверхности зеркала;

q_x – удельный тепловой поток, проходящий вдоль оси зеркала, который при абсолютной теплоизоляции боковой поверхности зеркала равен поглощенному рабочей поверхностью удельному потоку q_m ; k_x – контактный коэффициент теплообмена на тыльной поверхности зеркала, характеризующий интенсивность теплоотвода к узлу крепления; λ – коэффициент теплопроводности материала зеркала.

При теплоотводе от боковой поверхности главного зеркала возникает перепад температур по радиусу зеркала. Эту ситуацию будем кратко описывать терминами “радиальный теплоотвод” и “радиальный температурный перепад”. При этом в формуле (1) реализуются условия $i = 2, j = r$. В результате получим

$$\Delta \vartheta_2 = \frac{\vartheta_r}{2} - \vartheta_t = \frac{q_r r}{4bk_r} - \vartheta_t, \Delta \vartheta_r = \frac{q_r r^2}{4b\lambda}, \quad (4)$$

где $\vartheta_r = T_r - T_0$ – перегрев боковой поверхности главного зеркала относительно начальной температуры T_0 , $\Delta \vartheta_r$ – перепад температур по радиусу зеркала, q_r – удельный тепловой поток, проходящий в направлении радиуса зеркала, который при абсолютной теплоизоляции тыльной поверхности зеркала равен поглощенному рабочей поверхностью удельному потоку q_m ; k_r – контактный коэффициент теплообмена на боковой поверхности зеркала, характеризующий интенсивность теплоотвода к узлу крепления; r – внешний радиус главного зеркала.

Формула (1) включает четыре слагаемых, описывающих основные компоненты общей термоабберации:

- термоабберация температурной неравномерности в главном зеркале ($B_m \Omega_j \Delta \vartheta_j$); этот компонент может быть значим при осевом теплоотводе, поскольку обычно реализуется условие $n \gg 1$ и $\Omega_x \approx n$; неравномерность нагрева вторичного зеркала обычно мала и малозначима;

- термоабберация температурной неоднородности ($B_m \Delta \vartheta_i$ и $B_s \Delta \vartheta_s$); составляющая $B_s \Delta \vartheta_s$ мала, так как обычно выполняются условия $B_s < B_m$ и $B_s < B_t$, но неустранима, что связано с конечной суммарной тепловой проводимостью пилонов, которыми вторичное зеркало крепится к корпусу; составляющая $B_m \vartheta_i$ целиком зависит от идеальности контакта – величины k_x или k_r ;

- термоабберация температурного уровня, которую можно определить как величину термооптической абберации положения изображения, вызванной изменением температуры телескопа относительно номинальной при

условии сохранения его изотермичности, то есть при сохранении равномерного распределения температур в зеркалах и равенства температур зеркал температуре корпуса. Этот компонент $D\vartheta_t$ определяется уровнем температуры корпуса и обычно в значительной степени определяет величину термоабберации положения. Неравномерность нагрева корпуса сравнительно легко может быть учтена, однако не имеет особого значения, поскольку она не влияет на ход лучей между зеркалами, а температурное расширение корпуса определяется его средней температурой.

Методика определения преимущественного направления теплоотвода основывается на оценке величин k_x и k_r из анализа конструкции крепления зеркала. Если такая оценка затруднена, необходимо провести расчеты термоаббераций по исходной формуле (1) для двух вариантов – только для осевого и только для радиального теплоотвода. Тот вариант, который показывает значительно большую величину Δf , фактически и имеет место в данной конструкции телескопа. Если проведенные для двух вариантов расчеты дают сопоставимые результаты, то необходимо решать задачу в двумерной постановке, что требует использования численных методов расчета.

3. Влияние температур корпуса телескопа и платформы крепления главного зеркала на характеристики теплового режима

Одна из типичных задач тепловых и термоабберационных расчетов формулируется следующим образом: определить допустимые диапазоны изменения температур корпуса телескопа и некоторых конструктивных элементов, например платформы крепления главного зеркала, в пределах которых обеспечивается термостабильность телескопа. Критерием термостабильности выбирается допустимое смещение фокальной плоскости. Решение такой задачи позволяет на начальных стадиях теплового проектирования определить облик и требования к характеристикам системы обеспечения теплового режима (СОТР) телескопа.

Проведем анализ на примере частного, но типичного случая крепления главного зеркала тыльной поверхностью к платформе (модель осевого теплоотвода).

Важно отметить, что в формуле для расчетов термоабберации положения перегрев

главного зеркала относительно корпуса может вычисляться независимо от того, крепится ли зеркало к самому корпусу или к отделенной от него платформе.

Рассмотрим в упрощенной постановке задачу определения требований к рабочим температурам корпуса телескопа и платформы, а также к величине контактного коэффициента теплообмена между тыльной поверхностью зеркала и платформой с целью определения диапазонов изменения этих величин, в пределах которых термоабберация положения не выйдет за допустимые пределы. Эта область определяет границы термостабильного состояния телескопа.

В тепловой модели рассматриваемого телескопа принимаем, что тепловой контакт между главным зеркалом и корпусом отсутствует. При этом теплообмен между ними происходит за счет излучения, а между вторичным зеркалом и корпусом – контактным способом через пилон. Главное зеркало крепится к платформе, не имеющей тепловой связи с корпусом.

Дальнейшие расчеты будем проводить для телескопа, осуществляющего дистанционное зондирование Земли. Для наглядности анализа ограничимся случаем стационарного теплового режима.

Процесс стационарного теплообмена зеркала с корпусом и платформой можно описать в виде эквивалентной тепловой цепи (рис. 1).

На рис. 1 q_t и q_m – части общего теплового потока q_x , поглощаемого рабочей поверхностью главного зеркала; ϑ_0 – перегрев платформы, k_t – коэффициент теплообмена излучением зеркала с корпусом, k_m – эффективный коэффициент теплопередачи теплопроводностью от рабочей поверхности зеркала к тыльной.

В тепловой цепи коэффициенты теплообмена k_t и k_m определяются по формулам

$$k_t = 0,227\varepsilon_{\Pi}\varphi\left(\frac{T_H}{100}\right)^3, \quad k_m = \frac{\lambda}{b}, \quad (5)$$

где ε_{Π} – приведенная степень черноты системы главное зеркало–корпус, φ – коэффициент облученности корпуса зеркалом.

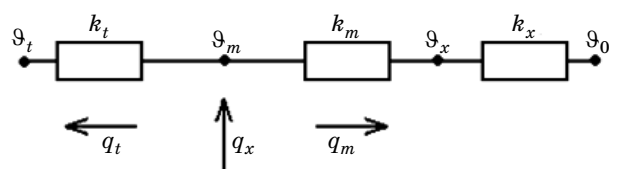


Рис. 1. Схема эквивалентной тепловой цепи для главного зеркала.

Тепловой поток q_x разделяется на две части и распространяется в левую q_t и правую q_m часть цепи:

$$q_x = q_t + q_m. \quad (6)$$

Тепловая цепь рассчитывается из системы уравнений

$$\begin{cases} q_x - q_m = k_t(\vartheta_m - \vartheta_t), \\ q_m = k_m(\vartheta_m - \vartheta_x), \\ q_m = k_x(\vartheta_x - \vartheta_0). \end{cases} \quad (7)$$

Из решения системы (7) следует

$$\vartheta_x = G \left[\frac{q_x}{k_m} + N_t \vartheta_t + (1 + N_t) N_x \vartheta_0 \right], \quad (8)$$

$$\Delta \vartheta_1 = \vartheta_m - \vartheta_x = GN_x \left[\frac{q_x}{k_m} + N_t(\vartheta_t - \vartheta_0) \right], \quad (9)$$

$$q_m = GN_x [q_x + k_t(\vartheta_t - \vartheta_0)]. \quad (10)$$

В формулах (8)–(10) введены обозначения

$$\begin{aligned} G &= (N_t + N_x + N_t N_x)^{-1}, \\ N_t &= k_t/k_m, \quad N_x = k_x/k_m. \end{aligned} \quad (11)$$

Из (8) можно получить условие равенства нулю перегрева тыльной поверхности главного зеркала ($\vartheta_x = 0$) при

$$\vartheta_t = -k_x \left(\frac{1}{k_t} + \frac{1}{k_m} \right) \vartheta_0 - \frac{q_x}{k_t}. \quad (12)$$

Из (9) можно получить условие отсутствия температурного перепада по толщине зеркала ($\Delta \vartheta_1 = 0$, а также и $q_m = 0$) при

$$\vartheta_t = \vartheta_0 - \frac{q_x}{k_t}. \quad (13)$$

Из соотношения (12) следует, что при больших значениях k_x и при $\vartheta_0 > 0$ условие (12) выполняется при весьма больших отрицательных величинах перегрева корпуса, что влечет за собой большую отрицательную термоабберацию температурного уровня. Однако если задать требования термостабилизации корпуса телескопа, т. е. $\vartheta_t = 0$, из (12) с учетом обычно выполняемого неравенства $k_m \gg k_t$ можно получить

$$\vartheta_0 = -q_x/k_x. \quad (14)$$

Условие (14) совместно с условиями $\vartheta_t = 0$ и $\vartheta_x = 0$ обеспечивают минимальную термо-

абберацию температурного уровня и температурной неоднородности.

Вместе с тем, при $\Delta \vartheta_1 = 0$ и $\vartheta_t = 0$, как следует из (13), должно выполняться равенство

$$\vartheta_0 = \frac{q_x}{k_t}. \quad (15)$$

В результате подходы к минимизации термоабберации температурной неоднородности и температурной неравномерности в главном зеркале находятся в противоречии, поскольку в первом случае перегрев платформы должен быть отрицательным, а во втором – положительным. Это противоречие необходимо разрешать на основе количественных расчетов вклада каждого из компонентов в общую термоабберацию положения.

Величина $\Delta \vartheta_s = T_s - 293$ определяется из уравнения

$$\sigma_{st}(T_s - T_t) + \sigma \varphi_s \varepsilon_s S_s T_s^4 = P_s, \quad (16)$$

где σ_{st} – проводимость между корпусом и вторичным зеркалом, P_s – поглощенный вторичным зеркалом лучистый тепловой поток, $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ Вт/м² К⁴ – постоянная Стефана–Больцмана, φ_s – коэффициент облученности между вторичным зеркалом и космосом, ε_s и S_s – коэффициент черноты и площадь поверхности вторичного зеркала соответственно.

4. Исходные параметры для расчета

В дальнейших расчетах принимались следующие значения параметров:

а) *параметры оптической системы* соответствуют конкретному телескопу Кессегрена и равны:

$R_m = 1,21$ м, $a = 0,11$ м, $e = 2,763$, $L = 378$ мм, $\alpha_m = \alpha_s = 1,5 \times 10^{-7}$ К⁻¹, $\alpha_t = 10^{-6}$ К⁻¹, $b = 0,03$ м, $n = 40,33$, диаметр входного зрачка $d = 350$ мм, фокусное расстояние $f = 1670$ мм, относительное отверстие оптической системы $A = d/f = 0,21$, значения коэффициентов в формуле (1) в мкм/К равны: $B_m = 0,413$, $B_s = -0,07$, $B_t = 1,72$, $D = -1,377$;

б) *теплофизические параметры* имеют следующие значения:

Потоки, поглощенные главным и вторичным зеркалами при нахождении телескопа на освещенном Солнцем участке траектории, составляют $P_m = 0,2$ Вт, $P_s = 1,86$ Вт; удельный тепловой поток, поглощенный главным зеркалом, $-q_x = 2$ Вт/м², поглощенный вторичным зеркалом – $81,75$ Вт/м²; теплопроводность си-

талла (материал главного и вторичного зеркал) $\lambda = 1,2$ Вт/м К; приведенная степень черноты $\varepsilon_{\text{п}} = 0,047$, коэффициент облученности главного зеркала корпусом $\varphi = 0,82$, начальная температура всех элементов телескопа $T_0 = 293$ К; для вторичного зеркала $\sigma_{st} = 0,0178$ Вт/К, $\varphi_s = 0,16$, $\sigma_s = 0,85$.

В результате вычислений получили следующие значения параметров: $k_t = 0,22$ Вт/м² К; $k_m = 40$ Вт/м² К; $N_t = 0,0055$. При $k_x = 0,01$ Вт/м² К получим $N_x = 0,00025$, $G = 173,6$, а при $k_x = 100$ Вт/м² К – $N_x = 2,5$ и $G = 0,379$.

5. Расчет термоабберации положения и ее составляющих

Результаты расчетов суммарной термодформации положения при различных величинах ϑ_t , ϑ_0 и k_x представлены в таблице. Как видно из данных этой таблицы, при хорошем тепловом контакте зеркала с платформой (при $k_x = 100$ Вт/м² К) и при крайних противоположных значениях перегревов корпуса телескопа и платформы ($\vartheta_t = -20$ К и $\vartheta_0 = 20$ К, а также $\vartheta_t = 20$ К и $\vartheta_0 = -20$ К) суммарная термоабберация превышает допустимое значение ± 33 мкм. В остальных ситуациях термоабберация остается в допустимых пределах.

Зависимости составляющих (или компонентов) термоабберации положения от перегрева платформы при крайних значениях $k_x = 0,01$ Вт/м² К и $k_x = 100$ Вт/м² К представлены на рис. 2–4 для трех значений перегрева корпуса.

Из этих рисунков можно сделать следующие выводы: для телескопа с данными параметрами составляющие термоабберации можно разделить на значимые и малозначимые, а точ-

Зависимость термоабберации положения от перегревов корпуса ϑ_t и платформы ϑ_0 и коэффициента контактного теплообмена k_x

ϑ_t , К	ϑ_0 , К	Термоабберация, мкм	
		$k_x = 0,01$ Вт/м ² К	$k_x = 100$ Вт/м ² К
-20	-20	30	27,1
	20	30,5	39,9
0	-20	5,1	-3,7
	20	5,7	9
20	-20	-26,3	-41,3
	20	-25,8	-28,6

нее, на способные в определенных условиях внести весомый вклад в термоабберацию положения (первая группа) и неспособные оказать сколь-нибудь существенное влияние (вторая группа).

К первой группе относятся термоабберация температурного уровня – четвертый компонент в формуле (1) и термоабберация температур-

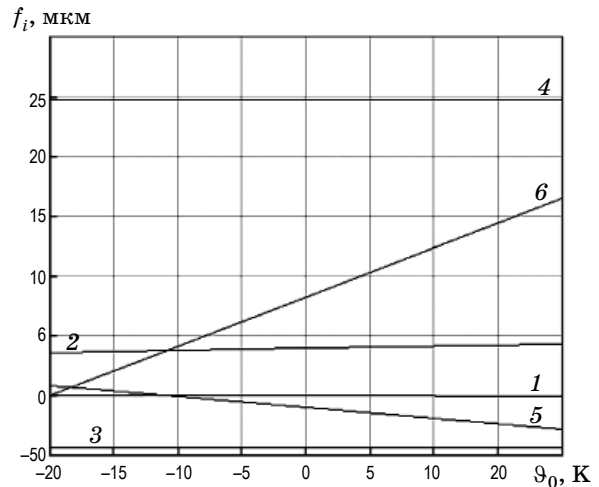


Рис. 2. Зависимости вклада составляющих в термонаведенное смещение фокальной плоскости от перегрева платформы при перегреве корпуса $\vartheta_t = -20$ К. 1 – первый компонент при $k_x = 0,01$, 2 – второй компонент при $k_x = 0,01$, 3 – третий компонент при $k_x = 0,01$ и $k_x = 100$, 4 – четвертый компонент при $k_x = 0,01$ и $k_x = 100$; 5 – первый компонент при $k_x = 100$, 6 – второй компонент при $k_x = 100$.

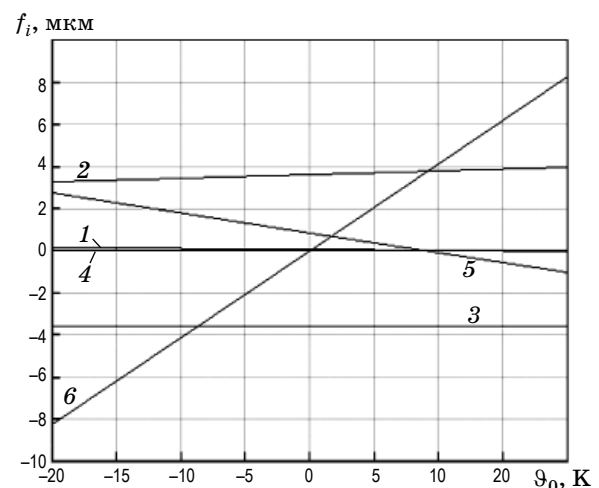


Рис. 3. Зависимости вклада составляющих в термонаведенное смещение фокальной плоскости от перегрева платформы при перегреве корпуса $\vartheta_t = 0$ К. Обозначения кривых 1–6 – те же, что в подписи к рис. 2.

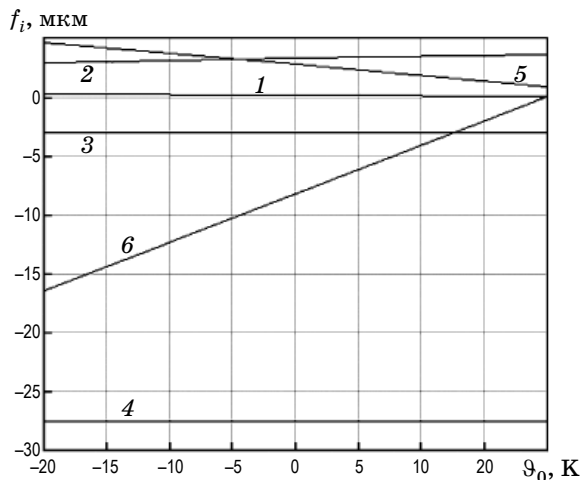


Рис. 4. Зависимости вклада составляющих в термонаведенное смещение фокальной плоскости от перегрева платформы при перегреве корпуса $\vartheta_t = 20$ К. Обозначения кривых 1–6 – те же, что в подписи к рис. 2.

ной неоднородности главного зеркала – второй компонент в формуле (1). Термоабберрация температурного уровня, как и следовало ожидать, велика при значительном перегреве корпуса телескопа (линии 4 на рис. 2 и рис. 4). В случае отрицательного перегрева $\vartheta_t = -20$ К этот компонент имеет положительный знак (линия 4 на рис. 2), а при положительном перегреве $\vartheta_t = 20$ К его знак отрицательный (линия 4 на рис. 4). Это объясняется тем, что коэффициент D в формуле (1) при заданных значениях параметров телескопа отрицательный, а именно $D = -1,377$ мкм/К. Физически это означает, что при повышении температуры корпуса относительно номинального рабочего значения (при нагреве) корпус расширяется, расстояние от главного зеркала до вторичного увеличивается, что и приводит к уменьшению заднего отрезка (фокус телескопа уменьшается). При охлаждении корпуса происходит обратный процесс.

Термоабберрация температурной неоднородности главного зеркала значима при его хорошем тепловом контакте с платформой (при $k_x \geq 100$ Вт/м² К) – линия 6 на всех трех рисунках. При этом она всегда возрастает с ростом перегрева платформы от $\vartheta_t = -20$ К до $\vartheta_t = 20$ К. При отрицательном перегреве корпуса ($\vartheta_t = -20$ К) этот компонент положительный на всем диапазоне изменения ϑ_0 , а при $\vartheta_t = 20$ К – отрицательный. Он равен нулю при $\vartheta_0 = \vartheta_t = -20$ К и при $\vartheta_0 = \vartheta_t = 20$ К,

что соответствует результатам анализа баланса тепловых потоков в тепловой цепи на рис. 1. В случае, когда ϑ_t и ϑ_0 равны по абсолютной величине и противоположны по знаку, абсолютные значения второго компонента при $k_x = 100$ Вт/м² К равны. При $\vartheta_t = -20$ К и $\vartheta_0 = 20$ К вклад второго компонента равен +17 мкм, а при $\vartheta_t = 20$ К и $\vartheta_0 = -20$ К – -17 мкм.

Ко второй группе малозначимых компонентов при заданных параметрах телескопа относятся термоабберрация температурного уровня вторичного зеркала (это обусловлено низким значением коэффициента B_s : $|B_s| = 0,17 B_m$, $|B_s| = 0,04 B_t$ и $B_s = 0,05 D$), а также термоабберрации температурной неоднородности в главном зеркале (что объясняется весьма большой тепловой проводимостью зеркала в осевом направлении при $k_m = 40$ Вт/м² К). Указанные компоненты малы независимо от значения величин ϑ_t , ϑ_0 , k_x .

Отдельного анализа заслуживают данные рис. 3. Из него видно, что при $\vartheta_t = \vartheta_0 = 0$ остается один, хотя и малый, но принципиально неустранимый компонент – термоабберрация температурной неоднородности вторичного зеркала (линия 3). Термоабберрация температурной неоднородности для главного зеркала заметна только при $k_x = 0,01$ Вт/м² К, а термоабберрация температурной неоднородности, наоборот – при $k_x = 100$ Вт/м² К.

6. Выводы

Полученное аналитическое описание термоабберрации положения вида (1) для телескопов Грегори и Кессегрена позволяет анализировать вклад отдельных составляющих в суммарную термоабберрацию: термоабберрации температурной неоднородности в главном зеркале при осевом и радиальном теплоотводе, термоабберрации температурной неоднородности между элементами телескопа и термоабберрации температурного уровня.

Полученные формулы (1)–(4) и (8)–(11) положены в основу методики определения требований к допустимому диапазону изменений температур корпуса телескопа и к устройству крепления главного зеркала (платформы), а также к качеству теплового контакта между зеркалом и платформой. Это позволяет на начальной стадии проектирования определять требования к СОТР, обеспечивающей требуемые уровни термостатирования.

Простые соотношения (14) и (15) показывают, что требования к минимизации перегрева тыльной поверхности главного зеркала и температурного перепада по его оси находятся в противоречии. Это подтверждается данными исследований телескопа Кессегрена с конкретными параметрами, представленными на рис. 2–4.

К неустраняемым составляющим термоабerrации относятся термоабerrация температурного уровня вторичного зеркала, а также одна из термоабerrаций – температурная неоднородность для главного зеркала при малых k_x или термоабerrация температурной неравномерности в этом зеркале при больших k_x . В рассмотренном случае эти компоненты термоабerrации малозначимы.

Термоабerrация температурного уровня при рассмотренных значениях параметров телескопа может быть велика и ее знак противополо-

жен знаку приращения температуры (перегрева) корпуса. Необходимо отметить, что это полностью определяется знаком коэффициента D в формуле (1). Абсолютная величина этого коэффициента зависит от параметров оптической схемы. Для телескопа Грегори коэффициент B_s , входящий в D , положителен, причем его величина может быть достаточно большой, что приведет к снижению значимости компонента термоабerrации температурного уровня.

Полученные аналитические формулы составляют основу метода выбора параметров телескопов, определяющих его устойчивость к термонаведенной термоабerrации положения, определения требований к облик и параметрам СОТР, обеспечивающим в совокупности термостабильность телескопа. Такая методика может быть применима не только к телескопам Грегори и Кессегрена, но и к системам Ричи–Кретьена.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. *Волосов Д.С.* Фотографическая оптика. М.: Искусство, 1971.
2. *Абдусаматов Х.И., Лаповок Е.В., Ханков С.И.* Методы обеспечения термостабильности космического телескопа – солнечного лимбографа. СПб.: Изд. Политехнического университета, 2008. 194 с.
3. *Лаповок Е.В., Ханков С.И.* Аналитическая методика расчета термоабerrаций зеркального телескопа с учетом температурных градиентов в главном зеркале // Труды Оптического общества им. Д.С. Рождественского. VIII Международная конференция “Прикладная оптика – 2008” том 1. С. 139–142.
4. *Абдусаматов Х.И., Богоявленский А.И., Лаповок Е.В., Ханков С.И.* Исследование термостабильности зеркального телескопа – солнечного лимбографа в режиме непрерывного наблюдения за Солнцем // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 5. С. 51–59.