

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМОБАРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СРЕДЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ НА ПОЛОЖЕНИЕ И РАЗМЕР ИЗОБРАЖЕНИЯ

В. А. ЗВЕРЕВ, С. М. ЛАТЫЕВ, И. Н. ТИМОЩУК

Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: tim\_ir@rambler.ru

Для ряда приборов, особенно оптико-электронных, работа которых основана на применении современных, прежде всего матричных, приемников излучения, чувствительных в видимой и в ИК-области спектра, задача анализа влияния изменения температуры на параметры оптических систем, а следовательно и на выходные параметры этих приборов, представляется вполне актуальной. Приведены соотношения, определяющие положение и размер изображения при термобарическом изменении показателей преломления материала линз оптической системы. Показано, что на положение линзы при опоре ее преломляющей поверхности на базовую поверхность торца оправы или корпуса существенно большее влияние оказывают вызванные колебаниями температуры изменения диаметра окружности соприкосновения контактирующих деталей, чем изменения формы поверхности оптической детали. Показана необходимость пересчета показателей преломления материала линз при разработке оптических систем приборов, предназначенных для базирования в открытом космосе.

**Ключевые слова:** изменение температуры, термооптические аберрации, температурный коэффициент линейного расширения, термобарическое влияние, расфокусировка, осевые и радиальные смещения элементов

**Введение.** Некоторые оптические приборы, например зрительные трубы, применяемые в качестве наблюдательных средств, прицелов и т.п., используются в любых климатических и погодных условиях. Изменение температуры обычно не оказывает заметного влияния на их выходные параметры. Объективы зрительных труб имеют малое относительное отверстие. Поэтому вызванное колебаниями температуры изменение аберраций образованного ими изображения не выходит за пределы допустимого, а продольное смещение изображения легко компенсируется подвижкой окуляра.

Для других видов приборов, особенно оптико-электронных, в которых применяются современные, прежде всего матричные, приемники излучения, чувствительные в видимой и в ИК-области спектра, как правило, необходимо учитывать влияние температуры эксплуатации на их характеристики. Примером могут служить вещательные и репортажные камеры цветного телевидения, основанные на применении высокосветосильных объективов переменного фокусного расстояния, формирующих изображение дифракционного качества. Требуемые значения функциональных характеристик и параметров, определяющих качество изображения, удается получить только при соблюдении точных значений конструктивных параметров сложной многолинзовой оптической системы, применении прецизионной механики и разработке конструкций камер, эксплуатируемых в различных температурных режимах. Другим примером служат приборы и комплексы, работа которых основана на использовании излучения в ИК-области спектра, имеющие специальную, как правило, светосильную и широкоугольную оптику. Область излучения при построении их оптической системы определяет потребность в применении не только линзовых, но и зеркальных элементов, весьма чувствительных к изменению конструктивных параметров, а следовательно, и к изменению температур эксплуатации.

Названные приборы предназначены для работы в любых погодных и климатических условиях, в широком диапазоне изменения температуры окружающей среды. Поэтому анализ влияния изменения температуры на параметры оптических систем, а следовательно и на выходные параметры приборов, можно считать вполне актуальной задачей.

**Влияние изменения температуры оптических элементов на положение и величину изображения.** Колебания температуры окружающей среды приводят к изменению оптических постоянных материалов элементов оптических систем, геометрических параметров оптических и механических деталей. Низкая теплопроводность оптических материалов при резких изменениях температуры обуславливает появление в линзах температурных градиентов. Влияние неравномерного распределения температуры внутри оптических деталей на образуемое изображение теоретически рассмотрено профессором Г. Г. Слюсаревым [1] и показано на интересных примерах. Однако в реальных условиях применения приборов изменения температуры во времени можно считать достаточно плавными, а температуру всех элементов приборов — одинаковой. Исключение составляют приборы космического базирования: в этом случае необходимо применение специальных средств защиты приборов от теплового воздействия солнечного излучения.

Равномерное изменение температуры элементов оптического устройства приводит, прежде всего, к продольному смещению плоскости изображения. Зависимость показателя преломления от изменения температуры определяется формулой

$$n_t = n + \beta(t - t_0), \quad (1)$$

где  $n$  — относительный показатель преломления [2] при температуре  $t_0$ ;  $\beta$  — коэффициент приращения показателя преломления,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ .

Измерения показателя преломления  $n$  проводят в соответствии с ГОСТ 28869–90 при нормальных условиях рабочего пространства по ГОСТ 8.050-73: температура воздуха  $t_0 = 20,0 \pm 0,5$   $^{\circ}\text{C}$ ; атмосферное давление  $101,325 \pm 1,500$  кПа; относительная влажность воздуха  $58 \pm 10$  %.

В каталоге „Бесцветное оптическое стекло СССР“ [3] значения коэффициента  $\beta$  приведены для линии  $C'$  спектра кадмия как средние в диапазонах температур от  $-60$  до  $+20$  и от  $+20$  до  $+120$   $^{\circ}\text{C}$ .

Зависимость линейных параметров оптических деталей (толщин, радиусов кривизны) от изменения температуры определяется формулами:

$$\left. \begin{aligned} d &= d_0 [1 + \alpha(t - t_0)]; \\ r &= r_0 [1 + \alpha(t - t_0)]; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $d_0$  и  $r_0$  — значения толщины и радиуса кривизны при температуре  $t_0$ ;  $\alpha$  — температурный коэффициент линейного расширения,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ . В каталоге оптического стекла значения коэффициента  $\alpha$  приведены как средние в диапазонах температур от  $-60$  до  $+20$  и от  $+20$  до  $+120$   $^{\circ}\text{C}$ .

Если толщина линзы не является коррекционным параметром, то в первом приближении ее можно принять равной нулю. Применим приведенные выражения для определения величины продольного смещения изображения, образованного тонкой линзой. Оптическая сила тонкой линзы определяется формулой:

$$\varphi = \frac{1}{f'} = (n - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (3)$$

Дифференцируя эту формулу по  $n$ ,  $r_1$  и  $r_2$ , получаем:

$$\frac{df'}{f'^2} = dn \left( \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right) + (n - 1) \left( \frac{dr_1}{r_1^2} - \frac{dr_2}{r_2^2} \right).$$

Заменив дифференциалы конечными разностями, при  $dn=\beta\delta t$ ,  $dr_1=r_1\alpha\delta t$ ,  $dr_2=r_2\alpha\delta t$  и  $\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} = \frac{1}{(n-1)f'}$  получаем

$$\frac{df'}{f'} = \left( \alpha - \frac{\beta}{n-1} \right) \delta t, \quad (4)$$

где  $\delta t=t-t_0$  — разность температур. Положение предмета и изображения относительно главных плоскостей отдельного компонента в воздухе определяется известной формулой отрезков

$$\frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f'}, \quad (5)$$

где  $a$  — расстояние от передней главной плоскости до предмета;  $a'$  — расстояние от задней главной плоскости до изображения. Дифференцируя эту формулу по  $a$ ,  $a'$  и  $f'$ , получим:

$$daa' = a'^2 \left( \frac{da}{a^2} + \frac{df'}{f'^2} \right).$$

Естественно принять  $da=0$ . При этом в случае одиночной линзы в воздухе выражение (4) позволяет полученное выражение представить в виде:

$$\delta a' = a'^2 \varphi \left( \alpha - \frac{\beta}{n-1} \right) \delta t. \quad (6)$$

В тонком компоненте, состоящем из  $k$  тонких линз, главные плоскости всех линз совмещены, при этом оптическая сила компонента  $\varphi = \sum_{i=1}^{i=k} \varphi_i$ . Дифференцируя это выражение по

$\varphi_i$ , где  $i=1,2,\dots,k-1,k$ , получаем величину продольного смещения изображения, образованного сложным тонким компонентом:

$$\delta a'_k = a'_k{}^2 \delta t \sum_{i=1}^{i=k} \varphi_i \left( \alpha_i - \frac{\beta_i}{n_i - 1} \right). \quad (7)$$

Изменение фокусного расстояния тонкого компонента, обусловленное колебаниями температуры, определяет изменение масштаба (или поперечного увеличения) изображения. Чтобы определить, как изменяется поперечное увеличение изображения, образованного тонким компонентом, применим инвариант Лагранжа—Гельмгольца:  $n_1\alpha_1 l_1 = n'_k \alpha'_k l'_k$ , где  $aa\alpha = a'a'\alpha' = h$ ,  $l$  и  $l'$  — размер предмета и изображения в параксиальной области,  $h$  — высота осевого параксиального луча на главных плоскостях компонента. При этом

$$\frac{n_1\alpha_1}{n'_k\alpha'_k} = \frac{n_1}{n'_k} \frac{\alpha_1}{\alpha'_1} \frac{\alpha_2}{\alpha'_2} \dots \frac{\alpha_{k-1}}{\alpha'_{k-1}} \frac{\alpha_k}{\alpha'_k} = \frac{n_1}{n'_k} \frac{a'_1}{a_1} \frac{a'_2}{a_2} \dots \frac{a'_{k-1}}{a_{k-1}} \frac{a'_k}{a_k} = \frac{n_1}{n'_k} \prod_{i=1}^{i=k} \frac{a'_i}{a_i},$$

следовательно,

$$\frac{l'_k}{l_1} = \frac{n_1}{n'_k} \prod_{i=1}^{i=k} \frac{a'_i}{a_i}. \quad (8)$$

Логарифмически дифференцируя это выражение и заменив дифференциалы величин конечными разностями, получим

$$\frac{\delta l'_k}{l'_k} - \frac{\delta l_1}{l_1} = \frac{\delta n_1}{n_1} - \frac{\delta n'_k}{n'_k} + \sum_{i=1}^{i=k} \left( \frac{\delta a'_i}{a'_i} - \frac{\delta a_i}{a_i} \right). \quad (9)$$

Сумму членов в выражении (9) можно представить в виде:

$$\sum_{i=1}^{i=k} \left( \frac{\delta a_i}{a_i} - \frac{\delta a'_i}{a'_i} \right) = \frac{\delta a_1}{a_1} + \left( \frac{\delta a_2}{a_2} - \frac{\delta a'_1}{a'_1} \right) + \left( \frac{\delta a_3}{a_3} - \frac{\delta a'_2}{a'_2} \right) + \dots - \frac{\delta a'_k}{a'_k}.$$

Учитывая, что в случае тонкого компонента приращение  $\delta a'_i = \delta a_{i+1}$ , а отрезок  $a'_i = a_{i+1}$ , имеем 
$$\sum_{i=1}^{i=k} \left( \frac{\delta a_i}{a_i} - \frac{\delta a'_i}{a'_i} \right) = \frac{\delta a_1}{a_1} - \frac{\delta a'_k}{a'_k}.$$

Положение предмета при колебаниях температуры окружающей среды считается неизменным, следовательно,  $\delta a_1 = 0$ . Будем считать, что для тонкого компонента в воздухе показатель преломления среды в пространстве предметов и изображений остается неизменным, т.е.  $\delta n_1 = \delta n'_k = 0$ . При этом выражение (9) принимает вид:

$$\delta l'_k = \frac{\delta a'_k}{a'_k} l'_k. \quad (10)$$

В соответствии с выражением (7) отношение  $\frac{\delta a'_k}{a'_k} = a'_k \delta t \sum_{i=1}^{i=k} \varphi_i \left( \alpha_i - \frac{\beta_i}{n_i - 1} \right)$ . В результате принятых ограничений и выполненных преобразований находим, что относительная величина изменения изображения, образованного тонким компонентом, определяется выражением

$$\frac{\delta l'_k}{l'_k} = a'_k \delta t \sum_{i=1}^{i=k} \varphi_i \left( \alpha_i - \frac{\beta_i}{n_i - 1} \right). \quad (11)$$

Формулы (7) и (11) дают наглядное представление о влиянии изменения температуры окружающей среды на положение и величину изображения, образованного тонким компонентом, состоящим из произвольного числа линз, о зависимости продольного смещения и изменения размера изображения от термических свойств оптических материалов линз. Из этих формул следует, что термооптические aberrации [4] положения и увеличения изображения, образованного тонким компонентом, отсутствуют, если соблюдается условие:

$$\sum_{i=1}^{i=k} \varphi_i \left( \alpha_i - \frac{\beta_i}{n_i - 1} \right) = 0. \quad (12)$$

В первом приближении любой компонент оптической системы можно считать тонким [1]. Вполне очевидно, что если термооптические aberrации компенсированы в каждом тонком компоненте, то они компенсированы и в системе в целом.

При разработке конструкции и расчете оптической системы конструктор выбирает (или подбирает) материалы линз, прежде всего, из условия достижения требуемого качества изображения (минимизации остаточных aberrаций). Для анализа термооптических aberrаций, применив формулы (1) и (2), вычисляют значения показателя преломления и геометрические параметры линз при предельных значениях заданной температуры и выполняют расчет хода лучей через оптическую систему при полученных параметрах с помощью компьютерных программ, например, САРО, ОПАЛ, ZEMAX или др. Результаты расчета позволяют оценить потребность в компенсации термоaberrаций и наметить пути ее осуществления.

При разработке оптических систем все чаще применяются линзы и зеркала с несферическими поверхностями. Пусть образующая кривая поверхности оптической детали определяется уравнением:

$$y^2 = f(z) = a_1 z + a_2 z^2 + \dots + a_n z^n. \quad (13)$$

При изменении температуры на  $\delta t = t - t_0$  координаты произвольной точки поверхности  $Z, Y$  получают приращения и становятся равными;  $\tilde{Y} = Y(1 + \alpha \delta t)$ ;  $\tilde{Z} = Z(1 + \alpha \delta t)$ . Выразив отсюда координаты выбранной точки и подставив их в уравнение (13), получим

$$\frac{\tilde{Y}^2}{(1 + \alpha \delta t)^2} = \frac{a_1}{1 + \alpha \delta t} \tilde{Z} + \frac{a_2}{(1 + \alpha \delta t)^2} \tilde{Z}^2 + \dots + \frac{a_n}{(1 + \alpha \delta t)^n} \tilde{Z}^n. \quad (14)$$

Это выражение справедливо для любой точки поверхности. Поэтому в общем случае уравнение (13) с учетом изменения температуры можно переписать в виде:

$$y^2 = \tilde{a}_1 z + \tilde{a}_2 z^2 + \dots + \tilde{a}_n z^n, \quad (15)$$

где  $\tilde{a}_v = \frac{a_v}{T^{v-2}}$ . Таким образом, получена, как и следовало ожидать, подобная кривая [5] с коэффициентом подобия  $T = \alpha \delta t$ . При изменении температуры каждый коэффициент уравнения получает приращение

$$\delta a_v = \tilde{a}_v - a_v = a_v \frac{1 - T^{v-2}}{T^{v-2}}. \quad (16)$$

**Влияние изменения температуры на взаимное расположение оптических деталей в конструкции.** Рассмотрим простейший случай плотного прилегания поверхности линзы к торцу посадочного гнезда оправы [6], как показано на рис. 1.

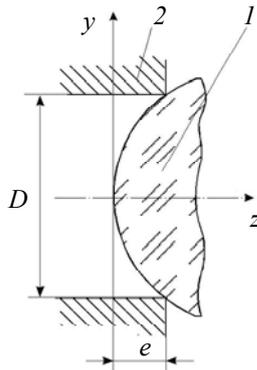


Рис. 1

Предположим, что образующая кривая прилегающей поверхности оптической детали 1 описывается уравнением (13). Тогда при колебаниях температуры окружающей среды произойдет подобное изменение формы поверхности в соответствии с уравнением (15) и диаметра  $D$  окружности соприкосновения детали 1 с деталью 2. В результате этого изменится размер стрелки прогиба  $e$  на диаметре  $D = 2y$ , отсчитываемой от вершины поверхности оптической детали 1 вдоль оси  $z$  в соответствии с принятым в оптике правилом знаков для продольных отрезков. Значение изменения стрелки с приемлемой точностью можно считать малым. Тогда, пренебрегая величинами второго порядка малости, значение изменения стрелки можно определить дифференцированием уравнения (13) с последующей заменой дифференциалов конечными разностями. В результате получаем

$$\delta e = \delta z = \frac{2y\delta y - (\delta a_1 z + \delta a_2 z^2 + \dots + \delta a_n z^n)}{a_1 + 2a_2 z + \dots + n a_n z^{n-1}}$$

или

$$\delta e = \frac{2y\delta y - \sum_{v=1}^{v=n} \delta a_v z^v}{\sum_{v=1}^{v=n} v a_v z^{v-1}}. \quad (17)$$

В этом выражении величина  $\delta a_v$  определяется формулой (16), причем коэффициент подобия  $T = 1 + \alpha_1 \delta t$ , где  $\alpha_1$  — температурный коэффициент линейного расширения материала оптической детали 1. Величина  $\delta y$  соответствует изменению температуры половины диаметра окружности соприкосновения и определяется в соответствии с законом температурного линейного расширения:  $\delta y = y \alpha_2 \delta t$ , где  $\alpha_2$  — температурный коэффициент линейного расширения материала детали 2.

При  $2y = D$  выражение (17) можно представить в виде:

$$\delta e = D^2 \alpha_2 \delta t \left/ 2 \sum_{v=1}^{v=n} v a_v z^{v-1} - \sum_{v=1}^{v=n} \frac{1-T^{v-2}}{T^{v-2}} a_v z^v \right/ \sum_{v=1}^{v=n} v a_v z^{v-1}. \quad (18)$$

Первый член правой части выражения (18) определяет величину изменения стрелки при обусловленном колебаниями температуры изменении диаметра окружности соприкосновения деталей, а второй член — прилегающей поверхности оптической детали. При этом выражение (18) можно записать в виде:

$$\delta e = \delta e(D) - \delta e(f(z)). \quad (19)$$

Рассмотрим случай, когда прилегающая поверхность оптической детали имеет сферическую форму, образующая кривая которой определяется уравнением:  $y^2 = 2rz - z^2$ , где  $r$  — радиус кривизны поверхности. При этом выражение (18) принимает вид:

$$\delta e = \left( \frac{1}{4} \frac{D^2}{r-e} \alpha_2 - \frac{re}{r-e} \alpha_1 \right) \delta t. \quad (20)$$

Для оценки входящих в это выражение величин приближенно принимаем:  $\frac{1}{4} \frac{D^2}{r-e} \approx 2 \frac{y^2}{2r} \approx 2e$ ;  $\frac{r}{r-e} \approx 1$ . При этом  $\delta e \approx (2\alpha_2 - \alpha_1) e \delta t$ .

Пусть, например, оптическая деталь изготовлена из стекла ОК1, имеющего наибольший из оптических стекол коэффициент линейного расширения, среднее значение которого, согласно ГОСТ 28869-90,  $\alpha_1 \approx 130 \cdot 10^{-7}$ , а материал оправы с наименьшим коэффициентом линейного расширения  $\alpha_2 = 8 \cdot 10^{-6}$  — сплав ВТ1 [7]. Даже при таком неблагоприятном для сравнительной оценки сочетании коэффициентов линейного расширения материалов контактирующих деталей влияние изменения диаметра окружности соприкосновения деталей в 1,23 раза больше, чем влияние вызванного колебаниями температуры изменения формы поверхности оптической детали. В общем случае это соотношение достигает двух и более.

В сложных конструкциях влияние изменения температуры на осевые или радиальные смещения элементов оптической системы, вызывающие расфокусировку и ухудшение качества изображения, можно найти, рассчитав размерные цепи [6]. Здесь рассмотрим простой пример температурного изменения воздушного промежутка между двумя линзовыми компонентами объектива, фрагмент которого представлен на рис. 2.

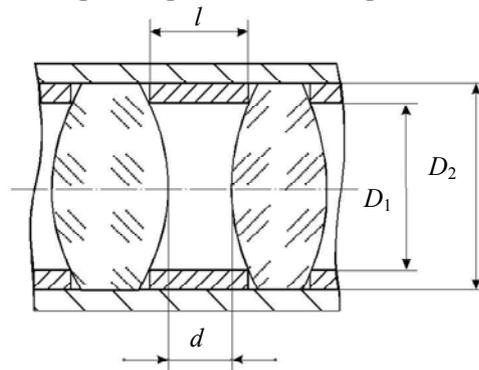


Рис. 2

Воздушный промежуток ( $d$ ) между линзами выдерживается с помощью промежуточного кольца размером  $l$ . При отклонении температуры от номинального значения на погрешность воздушного промежутка ( $\Delta d$ ) будет влиять не только обусловленное температурой изменение размера  $l$  кольца ( $\Delta l$ ), но и погрешности изготовления диаметров кольца  $D_1$  и  $D_2$ . Например,

$$\Delta d_{\Delta D1} \approx \frac{D_1}{4} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \Delta D_1,$$

где  $R_1, R_2$  — радиусы сферических поверхностей линз.

**Термобарическое влияние на оптическую систему приборов.** В 1960—1970-х гг. авиация достигла потолка свыше 30 км [10]. Современные самолеты оснащены фотографической аппаратурой для дневной и ночной съемки, оптико-телевизионными системами дневного и ночного действия, ИК-приборами, тепловизионными системами и пеленгаторами и др. На высоте 10—20 км температура атмосферы порядка  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ , атмосферное давление  $26,14 \pm 5,51$  кПа. Следовательно, при разработке оптико-электронной аппаратуры для авиационной техники необходимо проанализировать изменения выходных параметров аппаратуры при изменении термических и барических условий ее функционирования.

Для пересчета показателя преломления материала оптических элементов можно рекомендовать следующие формулы:

$$n(\lambda) = n_t(\lambda) \frac{N(\lambda, p, t, f)}{N(\lambda)} - \frac{\beta_{\text{абс}}}{N(\lambda)} (t - 20\text{ }^{\circ}\text{C}), \quad (21)$$

$$\begin{aligned} [N(\lambda, p, t, f) - 1] \cdot 10^8 = & \left( 8342,13 + \frac{2406030}{130 - k_0^2} + \frac{15997}{38,9 - k_0^2} \right) \times \\ & \times \frac{p}{96,0955} \frac{1 + p(6,13 - 0,1t) \cdot 10^{-6}}{1 + 0,003661t} - f(42,92 - 0,343k_0^2), \end{aligned} \quad (22)$$

где  $n(\lambda)$  — показатель преломления материала при нормальных условиях измерения (приведен в каталоге);  $n_t(\lambda)$  — показатель преломления материала при условиях применения;  $N(\lambda, p, t, f)$  — показатель преломления среды при условиях применения;  $N(\lambda)$  — показатель преломления воздуха при нормальных условиях измерения;  $p$  — давление окружающей среды, кПа;  $t$  — температура окружающей среды,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $f$  — парциальное давление водяного пара, кПа;  $k_0 = 1/\lambda$ ,  $\text{мкм}^{-1}$  — волновое число в вакууме (при  $\lambda = 0,54607$  мкм,  $k_0^2 = 3,35354$   $\text{мкм}^{-2}$ );  $\beta_{\text{абс}}$  — температурный коэффициент показателя преломления материала.

Первая формула следует из определения показателя преломления. Вторая представляет собой выражение, приведенное в ГОСТ 28869-90 для вычисления показателя преломления воздуха при условиях измерения. В соответствии с формулой (22) показатель преломления воздуха при нормальных условиях равен

$$\begin{aligned} [N(\lambda) - 1] \cdot 10^8 = & (8342,13 + 18998,09 + 450,03) \cdot \frac{101,325}{96,0955} \times \\ & \times \frac{1 + 101,325(6,13 - 0,1 \cdot 20) \cdot 10^{-6}}{1 + 0,003661 \cdot 20} - 1,35(42,92 - 0,343 \cdot 3,35354) = \\ & = 27790 \cdot 1,054 \cdot 0,9356 - 1,35 \cdot 41,77 = 27404 - 56 = 27348. \end{aligned}$$

В результате получаем  $N(\lambda) = 1,00027348$ .

Во второй половине прошлого века развитие космической техники определило потребность в оптико-электронных приборах космического базирования [11]. Наряду с космической фотографической аппаратурой создавались длиннофокусные телескопы для обзорного и детального наблюдения, крупногабаритные зеркально-линзовые объективы ИК-пеленгационной аппаратуры и объективы для телевизионной аппаратуры обнаружения.

Нормальное атмосферное давление на Международной космической станции — 101,3 кПа, такое же, как на уровне моря на Земле. Следовательно, давление атмосферы станции на стекло иллюминатора равно 1 атм  $\approx 1$  кгс/см<sup>2</sup>. Такое же давление должна испытывать фронтальная линза герметичного объектива в открытом космосе, собранного в земных условиях. Для исключения этого явления конструкция объектива не должна быть герметичной, т.е. все оптические элементы должны находиться в условиях глубокого вакуума и температуры среды на орбите базирования. В этом случае естественно принять  $p=0$  и  $f=0$ . Тогда в соответствии

с формулой (22) получаем  $N(\lambda, p, t, f) = 1$ . При этом формулу (21) для пересчета показателя преломления материала оптических элементов для оптической системы в космосе можно представить в виде:

$$n(\lambda_t) = n(\lambda)N(\lambda) + \beta_{\text{абс}}(t - 20^\circ\text{C}). \quad (23)$$

Таким образом, при разработке оптических приборов космического базирования важно сохранить не только положение и величину изображения, но и качество изображения, для чего, прежде всего, необходима разработка устройств и способов выравнивания температуры элементов прибора.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Слюсарев Г. Г.* Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1969. 672 с.
2. *Яворский Б. М., Детлаф А. А.* Справочник по физике. М.: Наука, 1971. 940 с.
3. Каталог „Бесцветное оптическое стекло СССР“. М.: Дом оптики, 1990. 130 с.
4. *Волосов Д. С.* Фотографическая оптика (Теория, основы проектирования, оптические характеристики): Учеб. пособие для киновузов. М.: Искусство, 1978. 543 с.
5. *Русинов М. М.* Несферические поверхности в оптике. М.: Недра, 1973. 296 с.
6. *Зверев В. А.* Замечание к расчету температурного изменения воздушных промежутков в оптической системе // Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1967. № 9. С. 96—100.
7. Справочник конструктора точного приборостроения / Под ред. *Ф. Л. Литвина*. М.—Л.: Машиностроение, 1964. 944 с.
8. РТМ 23—61. Методика расчета размерных цепей (на базе теории вероятностей). М.: Стандартгиз, 1962. 43 с.
9. *Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В.* Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. М.: Наука, 1969. 512 с.
10. Советский энциклопедический словарь / Гл. ред. *А. М. Прохоров*. М.: Сов. энциклопедия, 1988. 1600 с.
11. Инженерный справочник по космической технике / Под ред. *А. В. Солодова*. М.: Воениздат, 1969. 693 с.

#### Сведения об авторах

- Виктор Алексеевич Зверев** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, кафедра прикладной и компьютерной оптики
- Святослав Михайлович Латыев** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, кафедра компьютерной фотоники и видеоинформатики; E-mail: smlatyev@yandex.ru
- Ирина Николаевна Тимощук** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, кафедра компьютерной фотоники и видеоинформатики; E-mail: tim\_ir@rambler.ru

Поступила в редакцию  
27.01.18 г.

**Ссылка для цитирования:** *Зверев В. А., Латыев С. М., Тимощук И. Н.* Влияние термобарических свойств среды эксплуатации оптических приборов на положение и размер изображения // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 6. С. 498—506.

#### INFLUENCE OF THERMOBARIC PROPERTIES OF THE ENVIRONMENT OF OPTICAL INSTRUMENTS OPERATION ON POSITION AND SIZE OF THE IMAGE

**V. A. Zverev, S. M. Latyev, I. N. Timoshchuk**

*ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia  
E-mail: tim\_ir@rambler.ru*

The problem of analysis of the effect of temperature variations on parameters of optical systems is considered. Relations which determine position and size of the image under the influence of changes in

temperature and pressure on the refractive index of the lens material are derived. It is shown that when the lens spherical surface rests on the base surface of the end frame or housing, the changes in the diameter of the contact circle of the contacting parts caused by the temperature fluctuations have a much greater effect than changes in the shape of the surface of the optical element. It is demonstrated that recalculation of the refractive index of the lens material in development of optical systems for instruments designed for the use in outer space is necessary.

**Keywords:** temperature change, thermo-optical aberrations, temperature coefficient of linear expansion, temperature and pressure effect, defocusing, axial and radial displacement of the elements

**Data on authors**

- Viktor A. Zverev** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Applied and Computers Optics
- Svyatoslav M. Latyev** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Department of Computational Photonics and Videomatics;  
E-mail: smlatyev@yandex.ru
- Irina N. Timoshchuk** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Computational Photonics and Videomatics; E-mail: tim\_ir@rambler.ru

**For citation:** Zverev V. A., Latyev S. M., Timoshchuk I. N. Influence of thermobaric properties of the environment of optical instruments operation on position and size of the image. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 6. P. 498—506 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-6-498-506