

---

# ПРИКЛАДНАЯ И КОМПЬЮТЕРНАЯ ОПТИКА

---

УДК 535.317

В. А. ЗВЕРЕВ, Г. В. КАРПОВА, И. Н. ТИМОЩУК

## ТЕЛЕОБЪЕКТИВ С АФОКАЛЬНОЙ ДВУХЗЕРКАЛЬНОЙ НАСАДКОЙ

Показано, что замена выпуклой отражающей поверхности в афокальной системе из двух сферических зеркал плосковыпуклым зеркалом с внутренним отражением позволяет при малой остаточной величине отступления от условия изопланатизма успешно компенсировать остаточную сферическую aberrацию изображения. Дополнение афокальной насадки двухкомпонентным телеобъективом позволяет достичь плананастигматической коррекции aberrаций изображения.

**Ключевые слова:** отражающая поверхность, афокальная насадка, условия изопланатизма, сферическая aberrация.

Фокусное расстояние оптической системы, состоящей из афокальной насадки и объектива, в параксиальной области определяется формулой  $f' = \frac{h_1}{\alpha'} = \frac{h_1}{h_2} \frac{h_2}{\alpha'} = \Gamma f'_0$ , где  $f'_0$  — фокусное расстояние объектива;  $\Gamma = h_1/h_2$  — угловое увеличение изображения, образованного афокальной системой. При этом длина системы определяется как  $L_{0a.c} = d + f'_0$ , где  $d$  — расстояние между компонентами системы. В этом случае коэффициент уменьшения длины равен  $Q_{0a.c} = \Gamma / (1 + d / f'_0)$ . Отсюда следует, что чем больше  $\Gamma$ , тем больше  $Q_{0a.c}$ .

В работе [1] для компенсации сферической aberrации изображения, образованного сферической отражающей поверхностью, рассмотрена возможность применения плоскопараллельной пластиинки, расположенной в сходящемся пучке лучей. Показано, что при этом может быть достигнута весьма совершенная стигматическая коррекция aberrаций: волновая сферическая aberrация изображения бесконечно удаленной точки, образованного сферической отражающей поверхностью при относительном отверстии 1:1,5 и радиусе кривизны, равном 500 мм, в пределах всего зрачка не превышает 0,25 длины волны.

Продольная сферическая aberrация изображения точки, образованного оптической системой, состоящей из сферической и плоской отражающих поверхностей, определяется формулой

$$\Delta s'_{\text{сф}} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{2} / \sqrt{1 + \cos \sigma'} - 1 \right) r, \quad (1)$$

где  $\sigma'$  — задний апертурный угол,  $r$  — радиус кривизны образованной поверхности.

Сферическая aberrация изображения точки, образованного плоскопараллельной пластинкой толщиной  $d_{\text{пл}}$ , определяется формулой

$$\Delta s'_{\text{пл}} = \frac{d_{\text{пл}}}{n} \left( 1 - n \cos \sigma' / \sqrt{n^2 - \sin^2 \sigma'} \right).$$

Суммарная сферическая аберрация изображения, образованного системой отражающих поверхностей с плоскопараллельной пластинкой в сходящемся пучке лучей, равна  $\Delta s' = \Delta s'_{\text{сф}} + \Delta s'_{\text{пл}}$ . Положив  $\Delta s' = 0$ , получим

$$d_{\text{пл}} = \frac{1}{2} \frac{1 - \sqrt{2}/\sqrt{1 + \cos \sigma'}}{1 - n \cos \sigma'/\sqrt{n^2 - \sin^2 \sigma'}} nr. \quad (2)$$

Толщина пластиинки из стекла марки ТК8 ( $n_e = 1,61675$ ) при  $\sigma' = 30^\circ$  равна  $d_{\text{пл}} = -0,32r$ . Таким образом, для компенсации сферической аберрации изображения, образованного отражающей поверхностью сферической формы, необходима плоскопараллельная пластиинка достаточно большой толщины.

Рассмотрим аберрационные свойства изображения, образованного афокальной системой из двух отражающих поверхностей сферической формы с плоскопараллельной пластиинкой, расположенной в пространстве между поверхностями (рис. 1).

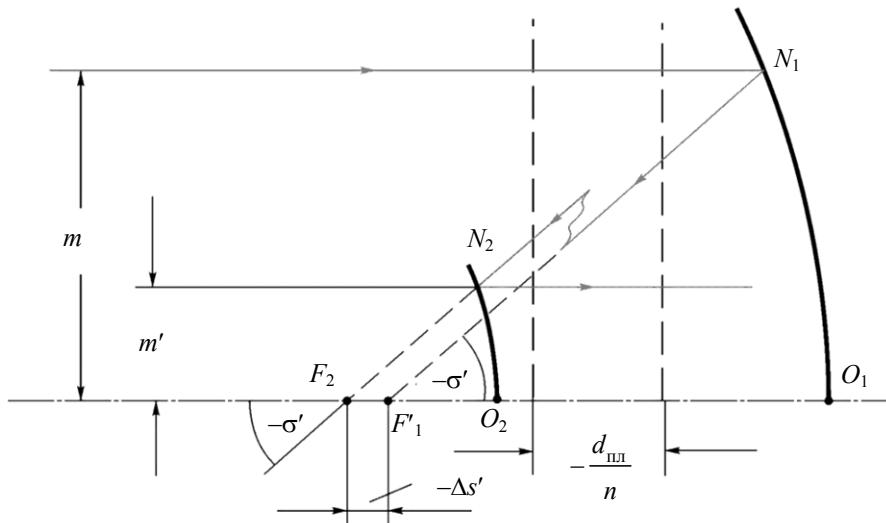


Рис. 1

Сферическая аберрация изображения, образованного сферической отражающей поверхностью, в соответствии с формулой (1) при некотором значении угла  $\sigma'$  прямо пропорциональна радиусу кривизны  $r$ . Совместим задний фокус вогнутой отражающей поверхности с передним фокусом выпуклой отражающей поверхности, образовав, таким образом, афокальную оптическую систему. Пусть на первую поверхность в точку  $N_1$  на высоте  $m$  падает луч, параллельный оптической оси. После отражения от поверхности луч пересекает оптическую ось под углом  $-\sigma'$  в точке  $F'_1$ , образуя продольную сферическую аберрацию изображения точки, равную  $F'_1 F'_1 = \Delta s'_1$ . Пусть луч, падающий на вторую поверхность в точку  $N_2$  под тем же углом  $-\sigma'$  к оптической оси, пересекая ее в точке  $F_2$  при  $F_2 F'_1 = F'_1 F_2 = \Delta s'_2$ , отражается от поверхности на высоте  $m'$  параллельно оптической оси, как показано на рис. 1. При этом расстояние между падающим на вторую поверхность и отраженным от первой поверхности лучами в направлении оптической оси равно  $\Delta s' = \Delta s'_1 + \Delta s'_2 = \Delta s'_1 - \Delta s'_2$ . Для компенсации этого смещения лучей толщина плоскопараллельной пластиинки должна определяться согласно формуле (2) следующим образом:

$$d_{\text{пл}} = \frac{1}{2} \frac{1 - \sqrt{2}/\sqrt{1 + \cos \sigma'}}{1 - n \cos \sigma'/\sqrt{n^2 - \sin^2 \sigma'}} n(r_1 - r_2). \quad (3)$$

При  $\Delta s' = 0$  координата  $m = r_1 \sin \gamma = r_1 \sin \frac{1}{2}\sigma'$ , а координата  $m' = r_2 \sin \gamma = r_2 \sin \frac{1}{2}\sigma'$ , где

$\gamma$  — угол между нормалью к поверхности и оптической осью. При этом угловое увеличение изображения, образованного рассматриваемой афокальной оптической системой, равно  $\Gamma = m / m' = r_1 / r_2$ , т.е. не зависит от угла  $\sigma'$ , а соответственно от координат  $m$  и  $m'$ . Следовательно, если компенсировать остаточную сферическую aberrацию, то изображение, образованное рассматриваемой оптической системой, будет обладать апланатической коррекцией aberrаций. Представим формулу (3) в виде

$$d_{\text{пл}} = \psi r_1 \left( 1 - \frac{r_2}{r_1} \right), \quad \psi = \frac{n}{2} \frac{1 - \sqrt{2}/\sqrt{1 + \cos \sigma'}}{1 - n \cos \sigma' / \sqrt{n^2 - \sin^2 \sigma'}}.$$

Но  $\frac{r_2}{r_1} = \frac{m'}{m} = k_3$ , где  $k_3$  — коэффициент центрального экранирования зрачка по диаметру. При этом  $d_{\text{пл}} = d(1 - k_3)$ , где величина  $d_{\text{пл}}$  определяется формулой (2) при  $r = r_1$ . Отсюда следует, что чем больше коэффициент центрального экранирования, тем меньше требуемая толщина пластиинки, а чем меньше толщина пластиинки, тем меньше масса объектива. Однако при этом уменьшается значение  $\Gamma$ , а следовательно, утрачивается практический смысл применения афокальной насадки.

Толщина пластиинки может быть сколь угодно малой, если вторую поверхность пластиинки заменить выпуклой поверхностью сферической формы внутреннего отражения (рис. 2).

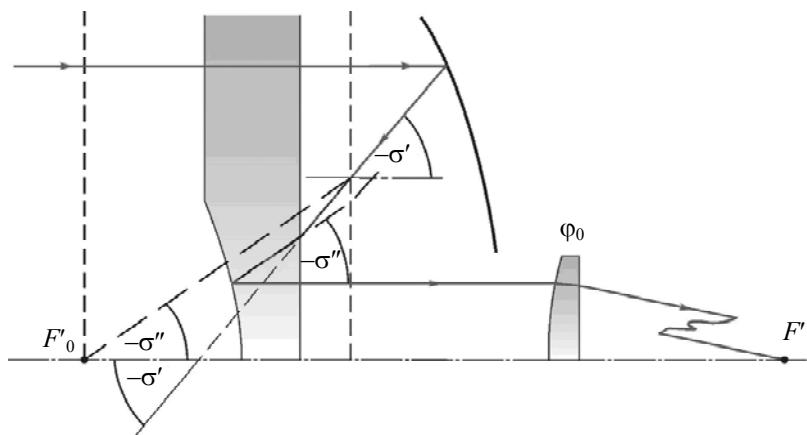


Рис. 2

Для aberrационного анализа афокальной системы телескопа запишем ее с помощью углов осевого виртуального луча в следующем виде:

$$\begin{array}{lll} \alpha_1 = 0 & & n_1 = 1 \\ \alpha_2 = \alpha & d_1 = & n_2 = -1 \\ \alpha_3 = \alpha/n & d_2 = d & n_3 = -n \\ \alpha_4 = 0 & d_3 = -d_2 & n_4 = n \\ \alpha_5 = 0 & & n_5 = 1 \end{array}$$

Коэффициенты сферической aberrации, комы, астигматизма третьего порядка и пеевалевой кривизны изображения можно определить выражениями вида [2, 3]

$$\begin{aligned} S_I^* &= S_I = B_0; \quad S_{II}^* = \frac{1}{J} S_{II} = K_0 + qB_0; \\ S_{III}^* &= \frac{1}{J^2} S_{III} = C_0 + 2qK_0 + q^2B_0; \quad S_{IV}^* = S_{IV} = D_0, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} B_0 &= \sum_{i=1}^{\mu} h_i P_i; \quad K_0 = -\sum_{i=1}^{\mu} W_i + \sum_{i=1}^{\mu} h_i S_i P_i; \\ C_0 &= \sum_{i=1}^{\mu} \frac{v_{i+1}\alpha_{i+1} - v_i\alpha_i}{h_i} - 2 \sum_{i=1}^{\mu} S_i W_i + \sum_{i=1}^{\mu} h_i S_i^2 P_i; \quad D_0 = \sum_{i=1}^{\mu} \frac{v_i\alpha_{i+1} - v_{i+1}\alpha_i}{h_i}; \\ W_i &= \frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{v_{i+1} - v_i} (v_{i+1}\alpha_{i+1} - v_i\alpha_i); \quad P_i = \frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{v_{i+1} - v_i} W_i; \quad S_i = \sum_{k=2}^i \frac{d_{k-1}}{n_k h_k h_{k-1}}; \quad v_i = \frac{1}{n_i}, \end{aligned}$$

а величина  $q$  определяется положением зрачка и предмета:  $q = \frac{v_1}{h_1^2 (1/s_1 - 1/s_{p1})}$ . При  $v_1 = 1$

и  $s_1 = \infty$  величина  $q = -s_{p1}$ , где  $s_{p1}$  — расстояние от первой поверхности системы до входного зрачка.

Пусть  $h_1 = 1$ , тогда  $h_2 = 1 - \alpha d_1$ ,  $h_3 = 1 - \alpha d_1 - \alpha d_2 / n$ , но  $h_3 = k_3$ . При этом  $d_1 = (1 - k_3) / \alpha - v d_2$ , тогда  $h_2 = k_3 + v \alpha d_2$ . При этих значениях величин коэффициент сферической aberrации третьего порядка определяется формулой

$$B_0 = [v(1-v^2)d_2\alpha - (1-4k_3+3v^2k_3)/4]\alpha^3.$$

Положив  $B_0 = 0$ , получим формулу, определяющую толщину пластинки:

$$d_2 = \frac{1-4k_3+3v^2k_3}{4v(1-v^2)\alpha}. \quad (4)$$

Отсюда следует, что  $d_2 \leq 0$  при  $1-4k_3+3v^2k_3 \geq 0$ . Этому условию удовлетворяют значения коэффициента  $k_3 \leq \frac{1}{v^2 + 4(1-v^2)}$ . Таким образом, при  $n = 1,5 \dots 2,0$  коэффициент  $k_3 \leq 0,375 \dots 0,308$ .

При толщине  $d_2$  зеркально-линзового компонента, определяемой выражением (4), расстояние  $d_1 = \frac{3-4v^2+v^2k_3}{4(1-v^2)\alpha}$ , а высота  $h_2 = \frac{1-v^2k_3}{4(1-v^2)}$ . Тогда, учитывая эти соотношения и выражение (4), находим коэффициенты  $S_i$ :

$$S_1 = 0, \quad S_2 = -\frac{d_1}{h_2} = -\frac{3-4v^2+v^2k_3}{(1-v^2k_3)\alpha}, \quad S_3 = -\frac{1-k_3}{k_3\alpha}.$$

При этом коэффициент комы третьего порядка определяется выражением  $K_0 = -(1-v^2)\alpha^2/4$ .

Дополним рассматриваемую афокальную систему тонким компонентом  $\phi_0$  (см. рис. 2), образовав оптическую систему телеобъектива. Будем считать, что в изображении, образованном афокальной системой и тонким компонентом, сферическая aberrация отсутствует. При этом параметр  $P_k$  тонкого компонента равен нулю. Вполне очевидно, что при апланатической коррекции aberrаций изображения, образованного оптической системой телеобъектива в целом, значение параметра  $W_k$  тонкого компонента должно удовлетворять условию  $W_k = -(1-v^2)\alpha^2/4$ .

Для тонкого компонента в составе телеобъектива имеем:  $\alpha_k = \alpha_5 = 0$ ,  $\alpha'_k = 1$ . Тогда при  $h_l = 1$  высота  $h_k = h_4 = h_3 = k_3$ . При этом

$$\begin{aligned} S_1 &= 0; \quad S_2 = -\frac{d_1}{h_2} = -\frac{3-4v^2+v^2k_3}{(1-v^2k_3)\alpha}; \quad S_3 = S_2 - \frac{vd_2}{h_2k_3} = -\frac{1-k_3}{k_3\alpha}; \\ S_4 &= \frac{1}{\alpha} - \frac{1-v^2k_3}{4(1-v^2)k_3^2\alpha}; \quad S_5 = S_4 + d_4 / (h_4h_5n_5). \end{aligned}$$

Принимаем  $d_4 = -d_1$ . Учитывая, что  $h_4 = h_5 = h_3 = k_3$ , получаем  $S_5 = (k_3^2 - 1)/(k_3^2\alpha)$ . Полученные соотношения позволяют выражение, определяющее коэффициент астигматизма изображения третьего порядка, представить в виде  $C_0 = \frac{k_3^2 + v^2k_3 - 2(1-v^2)}{4k_3^2}\alpha + \frac{1}{k_3}$ . Отсюда

следует, что при  $C_0 = 0$  угол  $\alpha$  определяется выражением  $\alpha = \frac{4n^2k_3}{2(n^2-1)-k_3(n^2k_3-1)}$ . Тогда

при  $0 \leq k_3 \leq 1$  угол  $\alpha$  принимает значения в интервале  $0 \leq \alpha \leq 4n^2 / (n^2 - 1)$ , т.е.  $\alpha \geq 0$ . В рассматриваемой оптической системе насадки угол  $\alpha < 0$ . Таким образом, при независимой коррекции сферической aberrации изображения, образованного афокальной насадкой и тонким компонентом, устранить астигматизм изображения невозможно.

Пусть толщина пластиинки в соответствии с формулой (4) определяется как  $d_2 = \frac{1-4k_3+3v^2k_3+\delta}{4v(1-v^2)\alpha}$ , где добавленная величина  $\frac{\delta}{4v(1-v^2)\alpha}$  характеризует изменение толщины пластиинки, нарушающее стигматичность изображения, образованного афокальной насадкой. При этом для апланатической коррекции aberrаций изображения, образованного телеобъективом, параметры тонкого компонента должны удовлетворять следующим условиям:

$P_k = \frac{\delta}{4k_3}\alpha^3$ ,  $W_k = -\frac{1-v^2}{4}\alpha^2 + \frac{\delta}{4k_3^2}\alpha^3$ . В этом случае при  $C_0 = 0$  угол  $\alpha$  определяется выражением  $\alpha = \frac{4k_3^3}{[2(1-v^2)-v^2k_3+k_3^2]k_3^2-\delta}$  и в рассматриваемой оптической системе насадки  $\alpha < 0$ . Для достижения этого величина  $\delta$  должна быть положительной, что соответствует увеличению толщины пластиинки.

Для коррекции кривизны поверхности изображения и астигматизма в качестве дополнительной следует использовать более сложную систему, например телеобъектив, состоящий из двух тонких компонентов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ . Схема такого объектива показана на рис. 3

В этом случае коэффициент  $D_0$  определяется выражением

$$D_0 = \frac{\alpha(k_3n^2-1)}{k_3n^2} + \frac{1-\varphi_1^2k_3d}{nk_3(1-\varphi_1d)}.$$

Из этого выражения находим, что при  $D_0 = 0$  расстояние между компонентами телесистемы, при котором кривизна поверхности изображения, образованного рассматриваемой системой в целом, равно

$$d = \frac{1}{\varphi_1} \frac{n + \alpha(k_3 n^2 - 1)}{\alpha(k_3 n^2 - 1) + k_3 n \varphi_1}. \quad (5)$$

Применение дополнительной системы в виде телескопа позволяет компенсировать и остаточный астигматизм изображения.

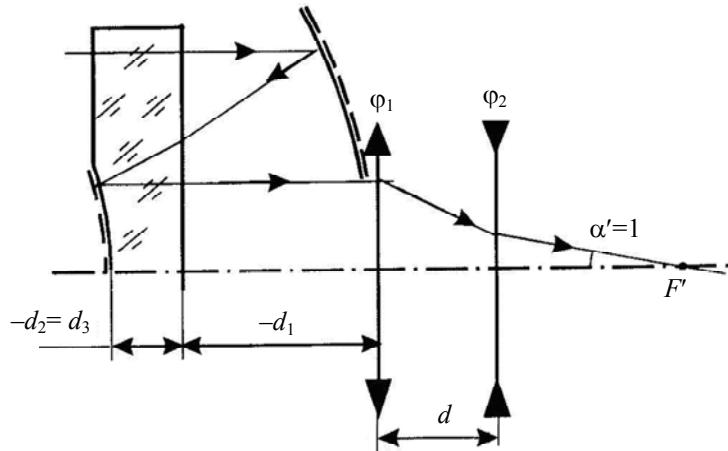


Рис. 3

Пусть сферическая aberrация изображения, образованного первым и вторым компонентами телескопа, отсутствует, т.е. пусть параметры  $P_1 = P_2 = 0$ . При этом для определения основных параметров  $P_i^*$  и  $W_i^*$  применим следующие формулы [4]:

$$P_i^* = \frac{1}{(\alpha' - \alpha)^3} \{ P_i - 4\alpha W_i + \alpha(\alpha' - \alpha)[2(2 + \pi)\alpha + \alpha'] \},$$

$$W_i^* = \frac{1}{(\alpha' - \alpha)^2} [W_i - \alpha(\alpha' - \alpha)(2 + \pi)].$$

Пусть параметры  $W_1 \neq W_2 \neq 0$ . Тогда выражения, определяющие коэффициенты aberrации третьего порядка, принимают следующий вид:

$$B_0 = 0, \quad K_0 = -\frac{\alpha^2(n^2 - 1)}{4n^2} - W_1 - W_2, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} C_0 = & \frac{\alpha}{4k_3 n^2} [k_3(2 - 3n^2) + 1] + \frac{1 - \varphi_1^2 k_3 d}{k_3(1 - \varphi_1 d)} + 2 \frac{1 - k_3^2}{\alpha k_3^2} W_1 + \\ & + 2 \left( \frac{1 - k_3^2}{\alpha k_3^2} - \frac{d}{k_3^2(1 - \varphi_1 d)} \right) W_2. \end{aligned} \quad (7)$$

Решая систему уравнений (6) и (7), при  $K_0 = C_0 = 0$  получаем значения параметров  $W_1$  и  $W_2$ , при которых оптическая система, состоящая из афокальной зеркально-линзовой насадки и телескопа, становится апланатическим плананастигматом.

Пусть  $W_1 \neq 0$ , а  $W_2 = 0$ . Тогда при  $K_0 = 0$  параметр  $W_1 = -\frac{\alpha^2(n^2-1)}{4n^2}$ . При этом коэффициент  $C_0$  определяется выражением

$$C_0 = -\frac{\alpha}{4k_3^2 n^2} [k_3^2 n^2 - k_3 + 2(n^2 - 1)] + \frac{1 - \varphi_1^2 k_3 d}{k_3 (1 - \varphi_1 d)}.$$

Отсюда находим, что при  $C_0 = 0$  расстояние

$$d = \frac{1}{\varphi_1} \frac{\alpha [k_3^2 n^2 - k_3 + 2(n^2 - 1)] - 4k_3 n^2}{\alpha [k_3^2 n^2 - k_3 + 2(n^2 - 1)] - 4k_3^2 n^2 \varphi_1}. \quad (8)$$

Предположим, что при одном и том же значении расстояния  $d$  отсутствуют астигматизм и кривизна поверхности изображения. Тогда, приравняв правые части выражений (5) и (8), получим  $\alpha n(k_3 \varphi_1 - 1) [(1 + 4n)(k_3 n^2 - 1) k_3 + 2(n^2 - 1)] = 0$ . Отсюда следует, что в рассматриваемом случае плананастигматическая коррекция aberrаций возможна при  $\varphi_1 = 1/k_3$ . При этом, как следует из выражения (8), расстояние между компонентами телескопа  $d = k_3$ , т.е. второй компонент телескопа расположен в плоскости изображения, выполняя функцию линзы Смита.

Пусть  $W_1 = 0$ , а  $W_2 \neq 0$ . Тогда при  $K_0 = 0$  параметр  $W_2 = -\frac{\alpha^2(n^2-1)}{4n^2}$ . При этом коэффициент  $C_0$  определяется выражением

$$C_0 = -\frac{\alpha}{4n^2 k_3^2} [k_3^2 n^2 - k_3 + 2(n^2 - 1)] + \frac{1 - \varphi_1^2 k_3 d}{k_3 (1 - \varphi_1 d)} + \alpha \frac{n^2 - 1}{2k_3^2 n^2} \frac{d}{1 - \varphi_1 d}.$$

Отсюда находим, что при  $C_0 = 0$  расстояние

$$d = \frac{\alpha [k_3^2 n^2 - k_3 + 2(n^2 - 1)] - 4k_3 n^2}{2\alpha(n^2 - 1) + \alpha \varphi_1 [k_3^2 n^2 - k_3 + 2(n^2 - 1)] - 4k_3^2 n^2 \varphi_1^2}. \quad (9)$$

В этом случае, приравняв правые части выражений (5) и (9), получим

$$\varphi_1 = \frac{1}{2k_3} + \frac{1}{4k_3^2} + \frac{2(n^2 - 1) [n + \alpha(n^2 k_3 - 1)]}{nk_3 [(1 + 4n)(n^2 k_3 - 1) + 2(n^2 - 1)]}.$$

При значении угла  $\alpha = -3,333$  и коэффициенте экранирования  $k_3 = 0,3$  оптическая сила первого компонента  $\varphi_1 = 4,616$ , расстояние между компонентами  $d = 0,172$ , оптическая сила второго компонента  $\varphi_2 = -6,23$ .

Технические характеристики телескопа с зеркально-линзовой афокальной насадкой приведены ниже.

Фокусное расстояние, мм.....	500,2
Диафрагменное число .....	5,00
Угловое поле ( $2w$ ) .....	$2^{\circ}00'$
Положение предмета относительно первой поверхности .....	$\infty$
Положение изображения относительно последней поверхности, мм .....	38,76
Диаметр входного зрачка, мм .....	100,0
Положение входного зрачка относительно первой поверхности, мм .....	1216,86
Положение выходного зрачка относительно последней поверхности, мм .....	-53,99
Основная длина волны, нм.....	546,07
Диапазон ахроматизации, нм .....	480,00—643,80

Конструктивные параметры и остаточные aberrации изображения, образованного такой системой, приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Номер поверхности	$r$ , мм	$d$ , мм	Марка стекла	$n$	$\varnothing_{\text{cb}}$ , мм
1	-300,000	-83,86		1,0000	
2	$\infty$	-18,19	TK16	-1,0000	117,86
3	-59,436	-11,27	Ф1	-1,6152	49,50
4	-145,152	11,27	Ф1	-1,6169	38,56
5	-59,436	18,19	TK16	1,6169	33,92
6	$\infty$	86,00		1,0000	33,64
7	597,778	12,00	TK1	1,5661	33,95
8	-48,013	7,00	Ф4	1,6285	37,28
9	-126,079	1,00		1,0000	37,35
10	230,306	9,80	TK1	1,5661	38,20
11	-197,357	81,60		1,0000	38,09
12	-46,140	8,00	СТК19	1,7477	17,96
13	-24,998	5,55	Ф1	1,6169	18,21
14	376,410			1,0000	18,02

Таблица 2

$S_0=\infty$	$s_{p0}$	$s'_{p0}$	$s'_0$	$f'_0$	$V(s_{p0})$	$s'_{\Delta}$	$s'_0(\lambda_1-\lambda_0)$	$s'_0(\lambda_2-\lambda_0)$
	1217,0	-53,99	38,761	500,16	0,1854	38,761	-0,001051	-0,001226
$2w=0$	$m$	$\Delta s'$	$\operatorname{tg}\sigma'$	$\delta g'$	$W$	$\eta, \%$	$\delta g'(\lambda_1-\lambda_0)$	$\delta g'(\lambda_2-\lambda_1)$
	50,0	0,139	0,100	0,0139	-0,0071	$0,9 \cdot 10^{-3}$	-0,0114	0,0156
	43,3	0,0215	0,0869	0,00187	-0,177	0,0224	-0,00681	0,00940
	35,4	-0,0354	0,0709	-0,0025	-0,150	0,0289	-0,00346	0,00474
	25,0	-0,0404	0,0501	-0,0020	-0,0544	0,0213	-0,00116	0,00154
$w$	$s_p$	$s'_{p}$	$\operatorname{tg}w'$	$y'$	$\Delta y'$	$z'_m$	$z'_s$	$z'_{m-s}$
0,0124	1217,0	-53,96	-0,0668	6,19	0,00357	-0,0073	-0,0027	-0,00458
0,0175	1217,0	-53,94	-0,0946	8,76	0,00995	-0,0058	-0,0029	-0,00292
$w=$ $=0,0175$	$m$	$\operatorname{tg}\sigma'$	$\delta \operatorname{tg}\sigma'$	$\delta g'$	$W$	—	$\delta g'(\lambda_1-\lambda_0)$	$\delta g'(\lambda_2-\lambda_0)$
	50,0	0,00535	0,0999	0,0103	0,456	—	-0,00790	0,0217
	43,3	-0,0079	0,0866	0,00545	0,273	—	-0,00333	0,0158
	35,4	-0,0238	0,0708	0,00320	0,153	—	0,000282	0,0111
	25,0	-0,0444	0,0502	0,00186	0,0597	—	0,00304	0,00764
	-18,8	-0,133	-0,0381	$-0,3 \cdot 10^{-3}$	-0,0114	—	0,00603	0,00410
	-26,5	-0,149	-0,0540	-0,0041	0,0396	—	0,00698	0,00264
	-32,5	-0,161	-0,0663	-0,0119	0,203	—	0,00823	0,000717
	-37,5	-0,171	-0,0766	-0,0239	0,519	—	0,00982	-0,00170
$w=$ $=0,0175$	$M$	$\operatorname{tg}\sigma'$	$\operatorname{tg}\sigma'_s$	$\delta G'$	$W$	$\delta g'$	$\delta G'(\lambda_1-\lambda_0)$	$\delta G'(\lambda_2-\lambda_0)$
	50,0	-0,0950	0,100	0,0230	0,383	-0,0042	-0,0120	0,0164
	43,3	-0,0949	0,0867	0,00759	0,0367	-0,0012	-0,00738	0,0101
	35,4	-0,0948	0,0708	$0,50 \cdot 10^{-3}$	-0,0603	$0,46 \cdot 10^{-3}$	-0,00392	0,00527
	25,0	-0,0947	0,0500	-0,0010	-0,0353	$0,84 \cdot 10^{-3}$	-0,00150	0,00191

Применение в качестве вторичного зеркала афокальной системы зеркально-линзового компонента с выпуклой поверхностью внутреннего отражения позволяет построить оптическую систему телеобъектива с плананастигматической коррекцией aberrаций образованного изображения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зверев В. А., Хлусова Н. И. Применение плоскопараллельной пластиинки для исправления сферической аберрации // ОМП. 1972. № 9. С. 24—25.
2. Чуриловский В. Н. Теория хроматизма и аберраций третьего порядка. Л.: Машиностроение, 1968. 312 с.
3. Зверев В. А. Основы геометрической оптики: Учеб. пособие. СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2002. 218 с.
4. Слюсарев Г. Г. Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1969. 672 с.

*Сведения об авторах***Виктор Алексеевич Зверев**

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики;  
E-mail: post\_vaz@rambler.ru

**Галина Васильевна Карпова**

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики

**Ирина Николаевна Тимощук**

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: tim\_ir@rambler.ru

Рекомендована кафедрой  
прикладной и компьютерной оптики

Поступила в редакцию  
07.02.13 г.

УДК 535.317

Е. В. ЕРМОЛАЕВА, В. А. ЗВЕРЕВ, И. Н. ТИМОЩУК

## ВОЛНОВАЯ АБЕРРАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ТОЧКИ ПРИ ЦЕНТРАЛЬНОМ ЭКРАНИРОВАНИИ ВХОДНОГО ЗРАЧКА

Определены условия, при которых волновая аберрация изображения точки для крайних лучей на входном зрачке оптической системы и для лучей на границе экранируемой части пучка равна нулю, что позволяет заметно уменьшить остаточную волновую аберрацию изображения точки.

**Ключевые слова:** волновая аберрация, изображение точки, выходной зрачок, центральное экранирование.

Волновая аберрация  $\Phi$  изображения точки при известной продольной сферической аберрации  $\Delta s'$  и продольном смещении  $\Delta'$  плоскости установки изображения с приемлемой точностью определяется выражением [1]

$$\Phi = \int_0^{\sigma'} \Delta s' \sin \sigma' \cdot d\sigma' - (1 - \cos \sigma') \Delta'.$$

На рис. 1 показано сечение меридиональной плоскостью сферы сравнения, проходящей через осевую точку  $P'$  и крайнюю точку  $Q'$  волнового фронта. Вполне очевидно, что волновая аберрация в плоскости сечения заметно уменьшится, если кривую сечения поверхности сравнения провести через крайнюю точку волнового фронта и крайнюю точку  $Q'_s$  его экранируемой части. В этом случае радиус кривизны окружности сечения становится равным  $R_s'$ . При этом для определения волновой аберрации используем точное выражение [2]