

# РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 535.317

## АБЕРРАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СХЕМЫ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОБЪЕКТИВА

© 2012 г. В. В. Ежова; В. А. Зверев, доктор техн. наук

СПбНИУ ИТМО, Санкт-Петербург

E-mail: evv\_foist@mail.ru, post\_vaz@rambler.ru

Определены условия, при которых в изображении, образованном оптической системой, состоящей из двух тонких компонентов, разделенных конечным воздушным промежуток, возможна плананастигматическая и анастигматическая коррекция аберраций третьего порядка.

**Ключевые слова:** изображение, оптическая система, тонкий компонент, аберрация, кривизна поверхности изображения, астигматизм.

Коды OCIS: 200.0200, 220.0220.

Поступила в редакцию 30.01.2012.

В вычислительной оптике достаточно широко применяется понятие тонкого компонента [1]. Тонким компонентом принято считать оптическую систему, состоящую из произвольного числа линз, толщины которых не являются коррекционными параметрами при аберрационном расчете системы, а следовательно, в первом приближении могут быть приняты равными нулю. Оптическая сила  $i$ -го тонкого компонента, состоящего из  $k$  тонких линз, равна

$$\Phi_i = \sum_{j=1}^{j=k} \Phi_j. \quad (1)$$

При этом петцвалева кривизна поверхности изображения, образованного этим компонентом, определяется коэффициентом

$$S_{IVi} = \sum_{j=1}^{j=k} \frac{\Phi_j}{n_j} = \Phi_i \pi_i, \quad (2)$$

где  $\pi_i = \sum_{j=1}^{j=k} \frac{\tilde{\Phi}_j}{n_j}$ ,  $\tilde{\Phi}_j = \Phi_j / \Phi_i$ .

Хроматические аберрации изображения, образованного тонким компонентом, определяются коэффициентом  $C$ , равным

$$C_i = - \sum_{j=1}^{j=k} \frac{\tilde{\Phi}_j}{v_j}, \quad (3)$$

где  $v_j$  – коэффициент дисперсии материала  $j$ -й линзы.

Для компонента из двух тонких линз в соответствии с формулами (1), (2) и (3) имеем

$$\tilde{\Phi}_1 + \tilde{\Phi}_2 = 1,$$

$$\pi = \tilde{\Phi}_1 / n_1 + \tilde{\Phi}_2 / n_2,$$

$$-C = \tilde{\Phi}_1 / v_1 + \tilde{\Phi}_2 / v_2.$$

Исключив из этих выражений величины  $\tilde{\Phi}_1$  и  $\tilde{\Phi}_2$ , получаем

$$\pi = \frac{1}{n_1 n_2} \frac{v_1 n_2 - v_2 n_1}{v_1 - v_2} + \frac{v_1 v_2}{n_1 n_2} \frac{n_2 - n_1}{v_1 - v_2} C. \quad (4)$$

Сферическая аберрация и кома третьего порядка в изображении, образованном оптической системой из двух склеенных тонких линз, будут отсутствовать, если в качестве материала линз выбрать стекло марки БФ7 и стекло марки ТФ3 соответственно [2] при рекомендованном значении коэффициента  $C$ , равном  $-0,0015$ . Для стекла марки БФ7  $n_e = 1,58216$ ,  $v_e = 53,57$ , а для стекла марки ТФ3  $n_e = 1,72317$ ,  $v_e = 29,29$ . При этом  $\pi = 0,689$ . Для двух склеенных тонких линз из стекол марок БК10 и ТФ2 при  $C = -0,002$  получаем  $\pi = 0,685$ . Для системы из двух тонких линз из стекол марок К8 и ТФ5 при  $C = 0$  величина  $\pi = 0,727$ . В общем случае в первом приближении величину  $\pi$  можно принять равной 0,7.

Оптическая сила системы, состоящей из двух тонких компонентов, равна

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 - \varphi_1\varphi_2d. \quad (5)$$

При этом коэффициент

$$S_{IV} = \pi(\varphi_1 + \varphi_2). \quad (6)$$

Если  $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_0 = 0$ , то  $\varphi = \varphi_0(2 - \varphi_0d)$ ,  $S_{IV} = 2\varphi_0\pi$ .

Пусть  $\varphi = 1$ , тогда получаем  $\tilde{S}_{IV} = (1 + \tilde{\varphi}_0^2\tilde{d})\pi$ . Величина  $d$  принципиально может принимать значения от нуля до  $1/\varphi_0$ , что соответствует изменению коэффициента  $S_{IV}$  в диапазоне  $\pi \leq \tilde{S}_{IV} \leq (1 + \tilde{\varphi}_0)\pi$ . Если  $\varphi_1 = 0$ , то  $\varphi_2 = \varphi$ , а если  $\varphi_2 = 0$ , то  $\varphi_1 = \varphi$ . Тогда при  $\varphi = 1$  независимо от величины  $d$  коэффициент  $\tilde{S}_{IV} = \pi$ . При этом в первом варианте построения оптической системы первый афокальный компонент будет выполнять функции компенсатора aberrаций изображения, образованного вторым компонентом, а во втором варианте построения – второй компонент будет выполнять функции компенсатора изображения, образованного первым компонентом. Вполне возможно построение оптической системы с двумя афокальными компенсаторами, один из которых расположен в параллельных пучках лучей, а другой – в сходящихся [3]. Однако важно заметить, что при таком построении оптической системы объектива “силовую” нагрузку будет нести лишь один из компонентов схемы, а следовательно, величина его относительного отверстия будет определять величину относительного отверстия всей системы.

Пусть  $\varphi_1 \neq 0$  и  $\varphi_2 \neq 0$ . При этом в общем случае можно принять, что  $\varphi_2 = k\varphi_1$ . Если  $\varphi_1 > 0$ , а коэффициент  $k < 0$ , то объектив принято называть телеобъективом. Длиной двухкомпонентной системы  $L_{ДКС}$  назовем расстояние от первого компонента до заднего фокуса (до плоскости изображения) системы в целом. Коэффициент укорочения телеобъектива, равный  $Q_{ДКС} = f'/L_{ДКС}$ , принимает экстремальное значение при  $d = 1/(2\varphi_1)$  [4]. При этом  $Q_{ДКС} = 4/(4 + k)$ . Практически важный вариант оптической системы объектива получаем при  $k = -1$ . В этом случае оптическая сила объектива  $\varphi = \varphi_1^2d$ , а коэффициент  $S_{IV} \approx 0$ . Если при  $\varphi_1 < 0$  коэффициент  $k < 0$ , то объектив при такой схеме построения оптической системы принято называть обратным телеобъективом.

В изображении, образованном однокомпонентной тонкой оптической системой, принципиально возможна коррекция лишь хрома-

тических aberrаций, сферической aberrации и комы третьего порядка. Дополнение однокомпонентной системы еще одним компонентом существенно расширяет ее коррекционные возможности. Будем считать, что при изображении предмета, расположенного на бесконечно большом расстоянии, осевой виртуальный луч [5] падает на оптическую систему под углом  $\alpha_1 = 0$  и пересекает первый компонент на высоте  $h_1 = 1$ , а второй компонент – на высоте  $h_2$ , образуя угол  $\alpha_2$  с оптической осью между компонентами и угол  $\alpha' = 1$  в пространстве изображений. Для  $i$ -го компонента в воздухе разность углов  $\alpha_{i+1} - \alpha_i = h_i\varphi_i$ . Следовательно, в рассматриваемом случае  $\alpha_2 = \varphi_1$ , а  $1 - \alpha_2 = h_2\varphi_2$ . Коэффициенты, определяющие сферическую aberrацию, кому, астигматизм, петцвалеву кривизну и дисторсию изображения, образованного оптической системой из двух тонких компонентов, можно определить выражениями вида [2, 4]:

$$S_I = P_1 + h_2P_2,$$

$$S_{II} = H_1P_1 + H_2P_2 + W_1 + W_2,$$

$$S_{III} = H_1^2P_1 + \frac{H_2^2}{h_2}P_2 + 2H_1W_1 + 2\frac{H_2}{h_2}W_2 + 1,43S_{IV}, \quad (7)$$

$$S_{IV} = 0,7(\varphi_1 + \varphi_2) = 0,7\left(\alpha_2 + \frac{1 - \alpha_2}{h_2}\right),$$

$$S_V = H_1^3P_1 + \frac{H_2^3}{h_2^2}P_2 + 3H_1^2W_1 + 3\frac{H_2^2}{h_2^2}W_2 + 3,7H_1\varphi_1 + 3,7\frac{H_2}{h_2}\varphi_2.$$

Заметим, что условие устранения дисторсии приводит к очень крутым поверхностям линз, а следовательно, к большим aberrациям высшего порядка. К тому же если угловое поле системы в пространстве предметов не превышает  $10^\circ - 15^\circ$ , то остаточную дисторсию можно не принимать во внимание при коррекции других aberrаций. Полагая высоты  $H_1$  и  $H_2$ , а также высоту  $h_2$  при выбранном значении угла  $\alpha_2$  известными, при заданных или выбранных значениях коэффициентов  $S_I$ ,  $S_{II}$  и  $S_{III}$  получаем три уравнения, из которых подлежат определению четыре неизвестных:  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $W_1$  и  $W_2$ . При определении значений этих параметров

следует руководствоваться тем, что чем они меньше, тем меньше влияние aberrаций высших порядков.

Вполне очевидно, что если положить  $P_1 = 0$ ,  $W_1 = 0$ ,  $P_2 = 0$  и  $W_2 = 0$ , то  $S_I = 0$  и  $S_{II} = 0$ . При этом коэффициенты  $S_{III} = 0$  и  $S_{IV} = 0$ , если выполняется условие

$$h_2 = (\alpha_2 - 1)/\alpha_2. \quad (8)$$

Отсюда следует, что высота  $h_2 > 0$ , если  $\alpha_2 > 1$  или  $\alpha_2 < 0$ . Полагая тонкие компоненты состоящими из двух склеенных линз, для вычисления конструктивных параметров определим их основные параметры  $\mathbf{P}$  и  $\mathbf{W}$ . Для этого применим следующие формулы ([2], формулы III.25)<sup>1</sup>:

$$P_i = (\alpha' - \alpha)^3 P_i + 4\alpha(\alpha' - \alpha)^2 W_i + \alpha(\alpha' - \alpha)[2\alpha(2 + \pi) - \alpha'];$$

$$W_i = (\alpha' - \alpha)^2 W_i + \alpha(\alpha' - \alpha)(2 + \pi). \quad (9)$$

Для первого компонента имеем:  $\alpha = 0$ ,  $\alpha' = \alpha_2$ ; для второго компонента угол  $\alpha = \alpha_2$ , а угол  $\alpha' = 1$ . При этом формулы (9) принимают вид:

$$P_1 = \alpha_2^3 P_1;$$

$$W_1 = \alpha_2^2 W_1;$$

$$P_2 = (1 - \alpha_2)^3 P_2 + 4\alpha_2(1 - \alpha_2)^2 W_2 + \alpha_2(1 - \alpha_2)[2\alpha_2(2 + \pi) - 1]; \quad (10)$$

$$W_2 = (1 - \alpha_2)^2 W_2 + \alpha_2(1 - \alpha_2)(2 + \pi).$$

Пусть  $P_2 = 0$  и  $W_2 = 0$ . Тогда, решая систему соответствующих уравнений, при  $\pi = 0,7$  получаем

$$P_2 = \alpha_2 \frac{1 + 5,4\alpha_2}{(1 - \alpha_2)^2}, \quad (11)$$

$$W_2 = -\frac{2,7\alpha_2}{1 - \alpha_2}. \quad (12)$$

Вычисление параметров двухлинзовых склеенных компонентов выполняем, применяя метод разделения переменных профессора Г.Г. Слюсарева. Основой для этого метода расчета является формула (I.7) из [1]:

<sup>1</sup> Основные параметры функций  $\mathbf{P}$  и  $\mathbf{W}$  в случае расположения предмета на бесконечно большом расстоянии от рассматриваемой оптической системы в [2] пишутся прямым полужирным шрифтом. Такое написание этих параметров авторы сохраняют и в этой статье.

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_0 + p(\mathbf{W} - \mathbf{W}_0)^2. \quad (13)$$

Величина  $p$  мало отличается от 0,85, а величина  $\mathbf{W}_0$  — от 0,14. При этом формулу (13) удобно представить как

$$\mathbf{P}_0 = \mathbf{P} - 0,85(\mathbf{W} - 0,14)^2. \quad (14)$$

Подставив в эту формулу соотношения (11) и (12), преобразуем ее к виду

$$\mathbf{P}_0 = \alpha_2 \frac{1 + 5,4\alpha_2}{(1 - \alpha_2)^2} - 0,85 \left( \frac{2,7\alpha_2}{1 - \alpha_2} + 0,14 \right)^2. \quad (15)$$

Теоретически угол  $\alpha_2$  может принимать значения в пределах от  $-\infty$  до  $+\infty$ . При  $\alpha_2 = \pm\infty$  величина  $\mathbf{P}_0 = -0,17056$ . Из формулы (15) следует, что угол  $\alpha_2$  принимает действительные значения при  $\mathbf{P}_0 \geq -0,17056$ . Номограмма, представленная в [1] (рис. I.1), определяет комбинации стекол, пригодных для решения поставленной задачи, при  $-2 \leq \mathbf{P}_0 \leq 1,5$ . Из формулы (15) следует, что при  $\mathbf{P}_0 = -0,15$  угол  $\alpha_2$  принимает два значения:  $\alpha_{21} = 5,576$ ,  $\alpha_{22} = -1,1632$ ; при  $\mathbf{P}_0 = -1,5$  —  $\alpha_{21} = 1,364$ ,  $\alpha_{22} = 0,666$ . Кривые зависимости  $\mathbf{P}_0 = \mathbf{P}_0(\alpha_2)$ , определяемой формулой (15), при  $-0,15 \leq \mathbf{P}_0 \leq 1,5$  представлены на рисунке.

Как было показано, коэффициент укорочения телеобъектива принимает экстремальное значение при  $d = \frac{1}{2\varphi_1} = \frac{1}{2\alpha_2}$ . При этом

$h_2 = 1 - \alpha_2 d = \frac{1}{2}$ . Из формулы (8) следует, что в этом случае угол  $\alpha_2 = 2$ . Подставив это значение  $\alpha_2$  в выражения (10), получаем

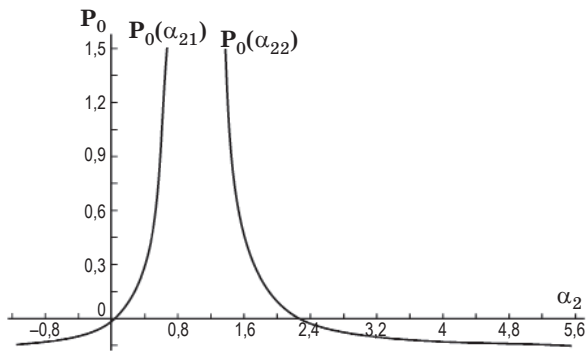
$$P_1 = 8P_1,$$

$$W_1 = 4W_1,$$

$$P_2 = -P_2 + 8W_2 - 19,6,$$

$$W_2 = W_2 - 5,4. \quad (16)$$

При  $P_1 = 0$  и  $W_1 = 0$  основные параметры  $\mathbf{P}_1 = 0$  и  $\mathbf{W}_1 = 0$ . Применив формулу  $\mathbf{P}_0 = \mathbf{P} - 0,85(\mathbf{W} - \mathbf{W}_0)^2$ , где для комбинации стекол “крон впереди” параметр  $\mathbf{W}_0$  принимается равным 0,1, получаем  $\mathbf{P}_0 = -0,0085$ . В качестве материала линз первого компонента выбираем стекла марок К8 и ТФ2. При  $P_2 = 0$  и  $W_2 = 0$  получаем систему уравнений, решив которую, получаем  $\mathbf{P}_2 = 23,6$  и  $\mathbf{W}_2 = 5,4$ . В этом случае для комбинации “флинт впереди” параметр  $\mathbf{W}_0$  принимается равным 0,2. При этом находим, что для второго компонента параметр



Кривые зависимости  $P_0 = P_0(\alpha_2)$ .

$P_0 = 0,616$ . Из ряда рекомендуемых пар стекол, соответствующих этому значению параметра  $P_0$ , в качестве материала линз второго компонента выбираем стекла марок ТФ5 и БК10. Окончательную (требуемую) компенсацию астигматизма выполняем путем изменения расстояния между компонентами с последующим масштабным преобразованием систе-

мы. Конструктивные параметры и остаточные aberrации рассчитанной системы приведены в табл. 1.

При  $\alpha_2 = n$  в качестве второго компонента (при строгом соответствии условию  $P_2 = 0$  и  $W_2 = 0$ ) можно применить мениск, первая поверхность которого конфокальна изображению осевой точки, образованному первым компонентом, а вторая поверхность – апланатическая поверхность первого вида [6], т. е. применить апланатический мениск. Для компенсации остаточных хроматических aberrаций, вносимых в изображение мениском, его следует дополнить так называемой хроматической преломляющей поверхностью [7]. Для этого показатель преломления линзы из кроны должен быть близким к показателю преломления линзы из флинта. Если основная (расчетная) длина волны света  $\lambda_e = 546,07$  нм, то этому условию удовлетворяют, например, такие пары стекол, как ТК8-Ф1, СТК9-ТФ4, ТК9-Ф2. Конструктивные параметры оптической системы телеобъектива, в котором второй компонент представляет собой апланатический

**Таблица 1.** Оптическая система двухкомпонентного телеобъектива ( $f'_0 = 200$  мм,  $D/f'_0 = 1:8$ ,  $2\omega = 12^\circ$ ) (вариант 1)

Конструктивные параметры									
№ пов.	Радиус, мм	Толщина, мм	Марка стекла	Показатель преломления	Световой диаметр, мм				
				1,000000					
1	67,140	4,30	К8	1,518296	25,27				
2	-47,100	2,20	ТФ2	1,677619	25,28				
3	-136,140	48,39		1,000000	25,47				
4	100,000	4,30	ТФ5	1,761712	24,02				
5	-561,000	2,20	БК10	1,571311	23,59				
6	32,150			1,000000	22,97				
Остаточные aberrации									
$S_0$	$S_p$	$S'_p$	$S'_{F'}$	$f'_0$	$S'_{\Delta F'}$	$s'_{0C'} - s'_{0e}$	$s'_{0F'} - s'_{0e}$	$s'_{0F'} - s'_{0C'}$	
$\infty$	0	-35,26	94,744	200,05	94,744	0,26376	0,030559	-0,23320	
$m$	$\Delta s'$	$\text{tg}\sigma'$	$\delta g'$	$W/\lambda$	$\eta \%$	$\delta g'_{C'} - \delta g'_e$	$\delta g'_{F'} - \delta g'_e$	$\delta g'_{F'} - \delta g'_{C'}$	
12,5	0,200	0,0625	0,0125	-0,0297	-0,0325	0,000142	0,0215	0,0214	
10,8	0,0244	0,0542	0,00132	-0,122	-0,0186	0,00401	0,0140	0,00998	
8,84	-0,0620	0,0443	-0,0027	-0,0991	-0,0087	0,00624	0,00786	0,00162	
6,25	-0,0675	0,0313	-0,0021	-0,0354	-0,0025	0,00638	0,00318	0,00319	
$\text{tg}\omega$	$S'_p$	$\text{tg}\omega'$	$y'$	$y' - y'_0$	$z'_m$	$z'_s$	$z'_m - z'_s$	$y'_{F'} - y'_e$	$y'_{C'} - y'_e$
0,0743	-34,49	-0,117	15,1	0,163	-0,134	-0,0383	-0,0960	-0,00708	0,00246
0,105	-33,68	-0,168	21,6	0,483	-0,0034	-0,0034	0,116-5	-0,00985	0,00307

мениск рассмотренной конструкции, и оставшиеся aberrации образованного объективом изображения представлены в табл. 2.

При  $\alpha_2 < 0$  оптическую систему принято называть обратным телеобъективом. Так, например, при  $\alpha_2 = -1$  высота  $h_2 = 2$ . При этом задний фокальный отрезок  $a'_2 = 2$ , а расстояние между компонентами  $d = 1$ . Кроме того, если в этом случае входной зрачок расположить в плоскости первого компонента, то в пространстве изображений будем иметь телецентрический ход главных лучей.

Заметим, что в схемах телеобъектива второй компонент уменьшает числовую апертуру световых пучков лучей, сформированных первым компонентом. Следовательно, для получения телеобъектива достаточно высокой светосилы необходимо существенное усложнение оптической системы его первого компонента. Поэтому при разработке светосильной, но достаточно узкопольной двухкомпонентной оптической системы кривизну поверхности изображения приходится исключать из числа корригируемых функций. Пусть  $\varphi_1 = \varphi_2$ . При этом возникнет естественный и практически важный вопрос о том, что будет с aberrационными свойствами изображения, образованного двумя одинаковыми тонкими компонентами при конечном расстоянии между ними.

При  $\varphi_1 = \varphi_2$  оба компонента становятся одинаковыми, если основные параметры  $\mathbf{P}_1 = \mathbf{P}_2 = \mathbf{0}$  и  $\mathbf{W}_1 = \mathbf{W}_2 = \mathbf{0}$ . При этом формулы (10) принимают вид  $P_1 = 0, W_1 = 0, P_2 = \alpha_2(1 - \alpha_2) \times [2\alpha_2(2 + \pi) - 1], W_2 = \alpha_2(1 - \alpha_2)(2 + \pi)$ . Подставив эти выражения в формулы (7), получаем

$$S_I = \alpha_2(1 - \alpha_2)[2\alpha_2(2 + \pi) - 1]h_2,$$

$$S_{II} = \alpha_2(1 - \alpha_2)[(2 + \pi)(2\alpha_2 H_2 + 1) - H_2],$$

$$S_{III} = \frac{H_2}{h_2} S_{II} + \frac{1 - \alpha_2}{h_2} [(2 + \pi)\alpha_2 H_2 + 1] + \alpha_2, \quad (17)$$

$$S_{IV} = 0,7 \left( \alpha_2 + \frac{1 - \alpha_2}{h_2} \right).$$

Учитывая, что  $\varphi_1 = \alpha_2$ , а  $h_2\varphi_2 = 1 - \alpha_2$ , при  $\varphi_1 = \varphi_2$  получаем  $\alpha_2 = 1/(1 + h_2)$ . Пусть  $h_2 = 1/2$ .

**Таблица 2.** Оптическая система двухкомпонентного телеобъектива ( $f'_0 = 200$  мм,  $D/f'_0 = 1:8$ ,  $2\omega = 12^\circ$ ) (вариант 2)

Конструктивные параметры									
№ пов.	Радиус, мм	Толщина, мм	Марка стекла	Показатель преломления		Световой диаметр, мм			
				1,000000					
1	78,190	4,10	K8	1,518296		25,76			
2	-55,800	2,00	TФ2	1,677619		25,79			
3	-161,950	71,64		1,000000		25,97			
4	53,440	4,10	Ф1	1,616878		25,37			
5	-523,940	2,00	TK8	1,616754		24,91			
6	29,230			1,000000		24,02			
Остаточные aberrации									
$S_0$	$S_p$	$S'_p$	$S'_{F'}$	$f'_0$	$S'_{\Delta F'}$	$s'_{0C'} - s'_{0e}$	$s'_{0F'} - s'_{0e}$	$s'_{0F'} - s'_{0C'}$	
$\infty$	0	-43,90	72,577	200,05	72,577	0,16227	0,14680	-0,015463	
$m$	$\Delta s'$	$\text{tg}\sigma'$	$\delta g'$	$W/\lambda$	$\eta \%$	$\delta g'_{C'} - \delta g'_e$	$\delta g'_{F'} - \delta g'_e$	$\delta g'_{F'} - \delta g'_{C'}$	
12,5	0,0612	0,0626	0,00383	-0,0542	-0,0066	0,221-4	0,0214	0,0214	
10,8	-0,0068	0,0542	-0,37-3	-0,0756	-0,0019	0,00236	0,0157	0,0133	
8,84	-0,0379	0,0442	-0,0017	-0,0529	0,672-3	0,00375	0,0106	0,00685	
6,25	-0,0349	0,0313	-0,0011	-0,0179	0,0013	0,00389	0,00601	0,00212	
$\text{tg}\omega$	$S'_p$	$\text{tg}\omega'$	$y'$	$y' - y'_0$	$z'_m$	$z'_s$	$z'_m - z'_s$	$y'_{F'} - y'_e$	$y'_{C'} - y'_e$
0,0707	-42,21	-0,126	14,4	0,227	-0,246	-0,0777	-0,169	-0,00516	0,00264
0,100	-40,39	-0,184	20,8	0,693	-0,0432	-0,0416	-0,00168	-0,00850	0,00472

Тогда  $\alpha_2 = 2/3$ . Вполне очевидно, что в случае узкопольной, но достаточно светосильной системы необходимо, прежде всего, компенсировать асимметрию пятна рассеяния в изображении внеосевой точки. Для этого естественно принять величину коэффициента  $S_{II} = 0$ . Тогда из второго уравнения системы (17) находим, что  $H_2 = (2 + \pi)/(1 - 2(2 + \pi)\alpha_2) = -(27/26)$ . При этом  $S_I = 0,29$ ,  $S_{III} = 0,09$ . В результате получили, что при сравнительно малой величине коэффициента  $S_I$  величина коэффициента  $S_{III}$  более чем в десять раз меньше, чем в предыдущем варианте системы. Однако в этом случае имеет важное значение положение входного зрачка, которое найдем из следующих соображений. При  $\beta_1 = 1$  высота точки пересечения главного виртуального луча с первым компонентом  $H_1 = a_p \beta_1 = a_p$ , где  $a_p$  – расстояние от первого компонента до центра входного зрачка. Угол  $\beta_2 = \beta_1 + H_1 \varphi_2 = 1 + H_1 \alpha_2$ . При этом

$$H_2 = H_1 - \beta_2 d = H_1 - (1 + H_1 \alpha_2) d. \quad (18)$$

С другой стороны,

$$h_2 = 1 - \alpha_2 d. \quad (19)$$

Из равенства величины  $d$  в выражениях (18) и (19) находим, что

$$H_1 = a_p = \frac{1}{h_2} \left( H_2 + \frac{1 - h_2}{\alpha_2} \right).$$

Подставив в это выражение известные величины, получаем  $a_p = -0,577$ .

Конструктивные параметры и остаточные aberrации рассчитанной оптической системы, состоящей из двух одинаковых компонентов, разделенных конечным воздушным промежуток, представлены в табл. 3.

Из таблицы следует, что при компенсации астигматизма в изображении, образованном рассматриваемой оптической системой, абсолютная величина остаточной петцвалеовой кривизны поверхности изображения в несколько раз меньше абсолютной величины составляющих астигматической разности изображения, образованного отдельным тонким компонентом в воздухе.

Заметим, что в области aberrаций третьего порядка осевая координата  $z'_p$  петцвалеовой

**Таблица 3.** Оптическая система двухкомпонентного телеобъектива ( $f'_0 = 100$  мм,  $D/f'_0 = 1:3$ ,  $2\omega = 12^\circ$ )

Конструктивные параметры									
№ пов.	Радиус, мм	Толщина, мм	Марка стекла	Показатель преломления		Световой диаметр, мм			
				1,000000					
1	87,950	10,00	К8	1,518296		46,11			
2	-55,290	3,00	ТФ2	1,677619		46,02			
3	-158,630	76,40		1,000000		46,30			
4	87,950	10,00	К8	1,518296		36,05			
5	-55,290	3,00	ТФ2	1,677619		34,85			
6	-158,630			1,000000		34,18			
Остаточные aberrации									
$S_0$	$S_p$	$S'_p$	$S'_{F'}$	$f'_0$	$S'_{\Delta F'}$	$s'_{0C'} - s'_{0e}$	$s'_{0F'} - s'_{0e}$	$s'_{0F'} - s'_{0C'}$	
$\infty$	-57,00	519,2	32,646	99,977	32,646	0,0044895	0,091571	0,087082	
$m$	$\Delta s'$	$\text{tg} \sigma'$	$\delta g'$	$W/\lambda$	$\eta \%$	$\delta g'_{C'} - \delta g'_e$	$\delta g'_{F'} - \delta g'_e$	$\delta g'_{F'} - \delta g'_{C'}$	
16,7	0,0650	0,169	0,0110	-0,0145	0,115	-0,0115	0,0300	0,0415	
14,5	0,0101	0,146	0,00148	-0,241	0,0710	-0,00698	0,0225	0,0295	
11,8	-0,0171	0,119	-0,0020	-0,204	0,0380	-0,00348	0,0157	0,0192	
8,35	-0,0196	0,0838	-0,0016	-0,0740	0,0147	-0,994-3	0,00931	0,0103	
$\text{tg} \omega$	$S'_p$	$\text{tg} \omega'$	$y'$	$y' - y'_0$	$z'_m$	$z'_s$	$z'_m - z'_s$	$y'_{F'} - y'_e$	$y'_{C'} - y'_e$
0,0743	504,7	0,0157	7,42	-0,0223	-0,302	-0,296	-0,00547	0,00134	0,00515
0,105	491,1	0,0229	10,5	-0,0629	-0,595	-0,592	-0,00351	0,00122	0,00813

поверхности изображения взаимосвязана с составляющими астигматической разности соотношением

$$z'_p = \frac{(3z'_s - z'_m)}{2}, \quad (20)$$

где  $z'_s$ ,  $z'_m$  – осевые координаты поверхности изображения, образованного узкими пучками лучей в сагиттальной и меридиональной плоскостях соответственно. Величина  $z'_p$  в процессе коррекции aberrаций путем “прогиба” линз остается, как правило, практически неизменной. Обозначив астигматическую разность координат  $z'_m - z'_s = \Delta z'_a$ , из выражения (20) находим, что

$$z'_s = z'_p + \frac{1}{2}\Delta z'_a, \quad (21)$$

$$z'_m = z'_p + \frac{3}{2}\Delta z'_a. \quad (22)$$

Отсюда следует, что при  $\Delta z'_a = 0$  координаты  $z'_m = z'_s = z'_p$ . Таким образом, если в рассматриваемой системе предусмотрена возможность компенсации кривизны поверхности изображения, то следует стремиться компенсировать астигматизм изображения. Если в исходной системе нет средств для компенсации кривизны поверхности изображения, но есть возможность воздействовать на величину остаточного астигматизма, то следует стремиться к тому, чтобы остаточная астигматическая разность была равна  $\Delta z' = -z'_p$ , поскольку при этом  $z'_s = -\frac{1}{2}z'_p$ , а  $z'_m = \frac{1}{2}z'_p$ . Однако далеко не всегда удается

достичь такой коррекции астигматизма. И тем не менее, как следует из выражений (21) и (22), даже компенсация остаточного астигматизма позволяет существенно уменьшить абсолютную величину координат  $z'_s$  и  $z'_m$ .

Процесс разработки конструкции оптической системы с технологически устойчивыми характеристиками, обладающей необходимыми коррекционными возможностями, плохо поддается формализации. Видимо, поэтому удачные конструктивные решения, найденные еще в XIX веке, оставили глубокий след в истории развития проектирования оптических систем и сохраняют свое значение до наших дней. К таким системам относится двухкомпонентный объектив, разработанный Й. Петцвалем, – исторически первый светосильный портретный фотографический объектив с хорошо исправленными сферической aberrацией и комой при удовлетворительном исправлении астигматизма и хроматических aberrаций. В объективе Петцваля не предусмотрена возможность коррекции кривизны поверхности образованного изображения. И тем не менее, созданный в 1840 году, он далеко опередил технику того времени и на протяжении более ста лет сохранял свое значение фотографического объектива. Схема объектива Петцваля до сих пор широко используется в микроскопии в качестве схемы микрообъектива небольшого увеличения или коррекционно-силового компонента в конструкциях высокоапертурных микрообъективов [8].

\* \* \* \* \*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Слюсарев Г.Г. Расчет оптических систем. Л.: Машиностроение, 1975. 640 с.
2. Слюсарев Г.Г. Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1969. 672 с.
3. Плошкин В.Х. Применение афокальных компенсаторов в линзовых объективах // Оптический журнал. 1979. № 5. С. 22–23.
4. Журова С.А., Зверев В.А. Основы композиции принципиальных схем оптических систем переменного увеличения // Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 10. С. 68–86.
5. Зверев В.А. Основы геометрической оптики. СПб.: СПб ГИТМО (ТУ), 2002. 218 с.
6. Грамматин А.П. Некоторые дифференциальные свойства апланатических поверхностей и использование этих свойств для оценки aberrаций высших порядков // В сб. “Современные методы расчета и проектирования оптических систем. Труды ГОИ”. Л.: Машиностроение, 1970. Т. XXXVII. В. 167.
7. Чуриловский В.Н. Теория хроматизма и aberrаций третьего порядка. Л.: Машиностроение, 1968. 312 с.
8. Русинов М.М. Техническая оптика: Учеб. пособие для оптических специальностей вузов. Л.: Машиностроение, 1979. 488 с.