

# РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 535.317

## МЕТОДЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЗЕРКАЛЬНОГО И ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВОГО РЕПРОДУКЦИОННОГО ОБЪЕКТИВА-ПЛАННАСТИГМАТА

© 2016 г. К. В. Ежова, канд. техн. наук; В. А. Зверев, доктор техн. наук; И. Н. Тимощук, канд. техн. наук

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

E-mail: post\_vaz@rambler.ru, tim\_ir@rambler.ru

Приведено обоснование выбора схемы оптической системы, формирующей изображение предмета при однократном увеличении. Определены условия плананастигматической коррекции аберраций изображения, образованного оптической системой из двух концентрических отражающих поверхностей при трёх отражениях от них. Показано, что ту же задачу можно решить, дополнив систему отражающих поверхностей концентрическим мениском, расположенным в падающем и отражённом пучках лучей или только в одном из них. Рассмотрен метод параметрического синтеза таких систем.

**Ключевые слова:** оптическая система, меридиональный и сагиттальный инварианты, апланат, анастигмат, концентрическая система поверхностей.

Коды OCIS: 080.0080, 110.0110.

Поступила в редакцию 17.12.2015.

Если осевую точку предмета совместить с центром кривизны концентрической системы отражающих поверхностей, то при нечётном числе поверхностей получим её действительное изображение. Вполне очевидно, что в этом случае в изображении точки будут отсутствовать сферическая аберрация и отступление от условия синусов. Если оптическая система состоит из трёх отражающих поверхностей, то углы, образованные осевым виртуальным (нулевым) лучом с оптической осью, равны:  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha$ , а показатели преломления разделяемых сред:  $n_1 = -n_2 = n_3 = -n_4 = n$ . При этом находим, что параметры  $P_i$  и  $W_i$ , определяющие монохроматические аберрации, вносимые в изображение поверхностями оптической системы [1, 2], равны

$$W_i = \frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{v_{i+1} - v_i} (v_{i+1} \alpha_{i+1} - v_i \alpha_i) = 0,$$

$$P_i = \frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{v_{i+1} - v_i} W_i = 0.$$

При этом коэффициенты первичных аберраций равны

$$S_I^* = B_0 = \sum_{i=1}^{i=3} h_i P_i = 0;$$

$$S_{II}^* = K_0 + qB_0 = K_0 = -\sum_{i=1}^{i=3} W_i + \sum_{i=1}^{i=3} h_i S_i P_i = 0;$$

$$S_{III}^* = C_0 + 2qK_0 + q^2 B_0 = C_0,$$

где

$$C_0 = \sum_{i=1}^{i=3} \frac{v_{i+1} \alpha_{i+1} - v_i \alpha_i}{h_i} - 2 \sum_{i=1}^{i=3} S_i W_i + \sum_{i=1}^{i=3} h_i S_i^2 P_i,$$

т. е.

$$S_{III}^* = \sum_{i=1}^{i=3} \frac{v_{i+1} \alpha_{i+1} - v_i \alpha_i}{h_i} = -2n\alpha \left( \frac{1}{h_1} - \frac{1}{h_2} + \frac{1}{h_3} \right), \quad (1)$$

$$S_{IV}^* = D_0 = \sum_{i=1}^{i=3} \frac{v_i \alpha_{i+1} - v_{i+1} \alpha_i}{h_i} = 2n\alpha \left( \frac{1}{h_1} - \frac{1}{h_2} + \frac{1}{h_3} \right). \quad (2)$$

Сагиттальная составляющая астигматизма определяется выражением [2]

$$z'_s = \frac{w^2}{2n\alpha} J^2 (S_{III}^* + S_{IV}^*).$$

Подставив в последнюю формулу выражения (1) и (2), находим, что  $z'_s = 0$ . Меридиональная составляющая астигматизма определяется следующим образом

$$z'_m = \frac{w^2}{2n\alpha} J^2 (3S_{III}^* + S_{IV}^*).$$

Выполнив замену коэффициентов выражениями (1) и (2), получаем

$$z'_m = -2w^2 J^2 \left( \frac{1}{h_1} - \frac{1}{h_2} + \frac{1}{h_3} \right).$$

Отсюда следует, что  $z'_m = 0$  при выполнении условия

$$\frac{1}{h_1} - \frac{1}{h_2} + \frac{1}{h_3} = 0. \quad (3)$$

Заметим, что при выполнении этого условия коэффициент  $S_{IV}^* = 0$ . Таким образом, систему, удовлетворяющую условию (3), по состоянию коррекции aberrаций можно назвать апланатическим плананастигматом.

В рассматриваемой системе  $h_1 = r_1\alpha$ ;  $h_2 = r_2\alpha$ ;  $h_3 = r_3\alpha$ . Из конструктивных и технологических соображений первую и третью отражающие поверхности можно заменить одной, т.е. принять  $r_1 = r_3$ . Тогда при выполнении условия (3) радиус кривизны второй поверхности  $r_2 = (1/2)r_1$ . Отсюда следует, что осевая точка второй поверхности совмещена с задним фокусом первой поверхности. Будем считать, что центр апертурной диафрагмы расположен в этой же точке. При этом в пространстве предметов и в пространстве изображений будем иметь телецентрический ход главных лучей. В результате получим оптическую систему, состоящую из двух concentрических отражающих поверхностей, при трёх отражениях от которых образующую изображение при поперечном увеличении  $V = -1^x$ .

Такая схема была положена в основу разработки объектива "Авангард" [3, 4]. Анализ aberrационных свойств изображения, образованного такой системой, позволяет определить

предельные значения параметров системы [5]. Однако разработка инженерного метода параметрического синтеза подобной системы остаётся актуальной задачей.

Оптическая схема системы представлена на рис. 1. На этом рисунке отрезки  $CO_1 = CN_1 = CN_3 = r_1$ ;  $CO_2 = CN_2 = r_2$ ;  $O_1O_2 = r_1 - r_2 = d_1$ ;  $d_2 = -d_1$ ;  $CA = y$ ;  $CA' = -y'$ . Параметрическую модель системы можно представить в виде

$$\begin{aligned} n_1 &= 1 \\ r_1 &= \\ d_1 &= r_1 - r_2 \quad n_2 = -1 \\ r_2 &= \\ d_2 &= -d_1 \quad n_3 = 1 \\ r_3 &= r_1 \\ n_4 &= -1 \end{aligned}$$

В соответствии с рис. 1

$$\sin \varepsilon_1 = -\frac{y}{r_1}, \quad (4)$$

а в соответствии с законом отражения  $\sin \varepsilon'_1 = -\sin \varepsilon_1$ . При этом  $\varepsilon'_1 = -\varepsilon_1$ ;  $\varepsilon_2 = -2\varepsilon_1$ ;  $\varepsilon'_2 = -\varepsilon_2$ . Для последующего анализа применим меридиональный и сагиттальный инварианты для узких пучков лучей в виде [6]

$$\frac{n' \cos^2 \varepsilon'}{s'_m} - \frac{n \cos^2 \varepsilon}{s_m} = \frac{n' \cos \varepsilon' - n \cos \varepsilon}{r}, \quad (5)$$

$$\frac{n'}{s'_s} - \frac{n}{s_s} = \frac{n' \cos \varepsilon' - n \cos \varepsilon}{r}. \quad (6)$$

В рассматриваемом случае  $s_{m1} = s_{s1} = r_1 \cos \varepsilon_1$ . Подставив соответствующие величины в меридиональный инвариант, получаем  $s'_{m1} = r_1 \cos \varepsilon_1$ .

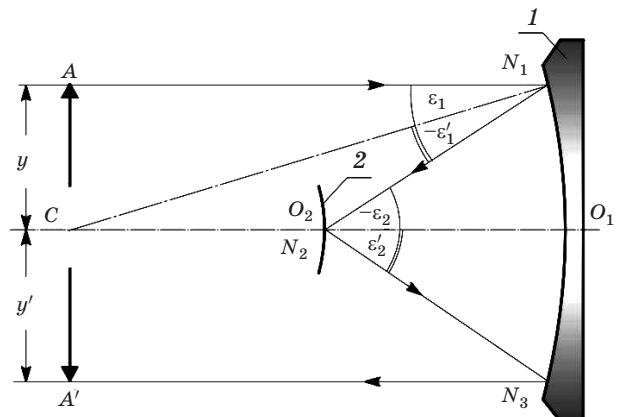


Рис. 1. Схема хода главных лучей оптической системы репродукционного объектива: 1 – главное зеркало, 2 – вторичное зеркало.

Из треугольника  $CN_1N_2$  следует, что  $CO_2 = O_2N_1 = r_2$ . При этом  $r_1 = 2r_2 \cos \varepsilon_1$ . Тогда

$$r_2 = \frac{r_1}{2 \cos \varepsilon_1}. \quad (7)$$

Отрезок  $s_{m2} = s'_{m1} - O_2N_1 = r_1 \cos \varepsilon_1 - r_2$ . Заменив  $r_2$  выражением (7), получаем

$$s_{m2} = \frac{r_1 \cos 2\varepsilon_1}{2 \cos \varepsilon_1}. \quad (8)$$

Подставив это выражение и косинусы углов  $\varepsilon_2$  и  $\varepsilon'_2$  в меридиональный инвариант, получаем

$$s'_{m2} = \frac{r_1 r_2 \cos 2\varepsilon_1}{2(r_1 - r_2 \cos \varepsilon_1)}. \quad (9)$$

Рассматриваемая система с ходом лучей симметрична по построению. В этом случае меридиональная составляющая астигматизма равна нулю, если  $s_{m2} = s'_{m2}$ , т.е. при выполнении равенства

$$\frac{r_1 \cos 2\varepsilon_1}{2 \cos \varepsilon_1} = \frac{r_1 r_2 \cos 2\varepsilon_1}{2(r_1 - r_2 \cos \varepsilon_1)}. \quad (10)$$

Отсюда находим, что это равенство выполняется, если выполняется условие

$$r_2 = \frac{r_1}{2 \cos \varepsilon_1}. \quad (11)$$

Применив сагиттальный инвариант, получаем:

$$s'_{s1} = r_1 \frac{\cos \varepsilon_1}{\cos 2\varepsilon_1}.$$

При этом

$$s_{s2} = s'_{s1} - r_2 = \frac{r_1}{2 \cos \varepsilon_1 \cos 2\varepsilon_1}.$$

Тогда

$$s'_{s2} = \frac{r_1 r_2}{2(r_1 - r_2 \cos \varepsilon_1) \cos 2\varepsilon_1}.$$

При равной нулю сагиттальной составляющей астигматизма в рассматриваемом случае должно выполняться условие:  $s_{s2} = s'_{s2}$ . Легко убедиться, что это равенство строго выполняется при выполнении условия:

$$r_2 = \frac{r_1}{2 \cos \varepsilon_1}. \quad (12)$$

Из сопоставления выражений (11) и (12) следует, что при  $r_2 = r_1/(2 \cos \varepsilon_1)$  и сагиттальная, и меридиональная составляющие астигматизма в изображении равны нулю.

Пусть, например,  $r_1 = -200$  мм,  $y = 25$  мм;  $\sin \sigma = 0,1$ . При этом в соответствии с форму-

лой (4)  $\sin \varepsilon_1 = 0,125$ ;  $\cos \varepsilon_1 = 0,992$ . Подставив соответствующие величины в выражение (11) или (12), получаем  $r_2 = -100,79$  мм; при сохранении концентричности поверхностей расстояние между ними  $d_1 = r_1 - r_2 = -99,21$  мм. Конструктивные параметры полученной системы и остаточные aberrации изображения приведены в табл. 1.

В изображении, образованном рассматриваемой системой, aberrации в сагиттальной плоскости отсутствуют при любой апертуре [7]. Меридиональная составляющая астигматизма  $z'_m$  равна нулю только для одного значения  $\sin \varepsilon_1$ , т.е. для одной точки предмета. Для системы, параметры которой представлены в табл. 1, такой точкой выбрана крайняя точка поля  $(z'_m)_{\text{last}}$  ( $(z'_m)_{\text{last}} = 0$ ). Кривая зависимости  $z'_m = z'_m(y)$  представлена на рис. 2а. Таким образом, в рассматриваемом случае допустимая величина изображаемого предмета определяется допустимой величиной экстремального значения  $(z'_m)_{\text{extr}}$ . Этот вариант компенсации меридиональной составляющей астигматизма назовём первым вариантом компенсации.

Подбором величины  $\sin \varepsilon_1$  можно получить компенсацию меридиональной составляющей астигматизма при условии  $(z'_m)_{\text{last}} + (z'_m)_{\text{extr}} = 0$ . Вполне очевидно, что в этом случае величина изображаемого предмета при допустимой величине  $(z'_m)_{\text{extr}} = -(z'_m)_{\text{last}}$  будет больше, чем в предыдущем случае. Конструктивные параметры такой системы и остаточные aberrации образованного изображения представлены в табл. 2. Кривая зависимости  $z'_m = z'_m(y)$  представлена на рис. 2б. Этот вариант компенсации меридиональной составляющей астигматизма назовём вторым вариантом компенсации.

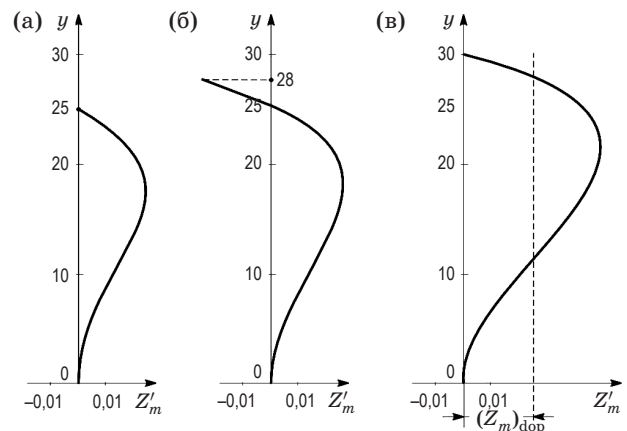


Рис. 2. Кривые зависимости  $z'_m = z'_m(y)$ .

**Таблица 1.** Зеркальный репродукционный объектив-плананастигмат (линейное поле  $2y = 50$  мм)

Линейное увеличение		-1,00				
Числовая апертура ( $A$ )		0,100				
Линейное поле предмета ( $2y$ ), мм		50,00				
Положение предмета относительно первой поверхности, мм		-200,00				
Положение изображения относительно последней поверхности, мм		200,00				
Диаметр входного зрачка		нет				
Положение входного зрачка относительно первой поверхности, мм		$\infty$				
Положение выходного зрачка относительно последней поверхности, мм		6179,11				
Основная длина волны, нм		546,07				
Конструктивные параметры						
№ пов.	Радиусы, мм	$D$ , мм	Марки стекол	Показатель преломления	Световые диаметры, мм	Стрелки, мм
1	-200,000	-99,21		1,0000		
2	-100,790	99,21		-1,0000	89,23	-5,04
3	-200,000			1,0000	20,17	-0,51
				-1,0000	89,22	-5,04
Остаточные aberrации						
$S_0$ , мм	$S_p$ , мм	$S'_p$ , мм	$S'_0$ , мм	$V_0$	$V_p$	$S'$ , мм
-200,0	$\infty$	6179,0	-200,0	1,000	0	-200,0
$y = 0$	$\sin\sigma$	$\Delta S'$	$\text{tg}\sigma'$	$\delta g'$	$W$	$\eta(\%)$
	0,100	0	-0,101	0	0	0
	0,0707	0	-0,0709	0	0	0
$y$ , мм	$S_p$	$S'_p$	$\text{tg}\sigma'_{gl}$	$y'$	$\Delta y'$	$Z'_m$
17,7	$\infty$	12343,0	-0,0014	-17,7	$0,18 \times 10^{-4}$	
25,0	$\infty$	$-0,94 \times 10^7$	$0,267 \times 10^{-5}$	-25,0	0	
$y$ , мм	$\sin\sigma_m$	$\text{tg}\sigma'_m$	$\delta \text{tg}\sigma'_m$	$\delta g'$	$W(0)$	
25,0	0,100	-0,101	-0,101	$-0,95 \times 10^{-4}$	-0,0040	
	0,0707	-0,0709	-0,0709	$-0,31 \times 10^{-4}$	$-0,86 \times 10^{-3}$	
	-0,0707	0,0709	0,0709	$0,312 \times 10^{-4}$	$-0,86 \times 10^{-3}$	
	-0,100	0,100	0,100	$0,949 \times 10^{-4}$	-0,0040	
$y$ , мм	$\sin\sigma_s$	$\text{tg}\sigma'_m$	$\text{tg}\sigma'_s$	$\delta G'$	$W$	$\delta g'$
25,0	0,100	$0,269 \times 10^{-5}$	-0,101	0	0	0
	0,0707	$0,268 \times 10^{-5}$	-0,0709	0	0	0

Пусть кривая зависимости  $z'_m = z'_m(y)$  имеет вид, представленный на рис. 2а, но при  $(z'_m)_{\text{extr}} = 2(z'_m)_{\text{dop}}$  (где  $(z'_m)_{\text{dop}}$  – допустимая величина меридиональной составляющей астигматизма), как показано на рис. 2в. Сместив плоскость установки изображения на расстояние  $\Delta z'_m = (z'_m)_{\text{dop}}$ , в соответствии с рис. 2в получаем:  $z'_{m0} = z'_m - \Delta z'_m$ ;  $z'_{s0} = z'_s - \Delta z'_s$ , где  $z'_{m0}$  и  $z'_{k0}$  – остаточные значения меридиональной и сагиттальной составляющих астигматизма соответственно. При  $z'_m = (z'_m)_{\text{last}} = 0$  остаточная меридиональная составляющая астигматизма на краю поля  $(z'_m)_{\text{last0}} = -\Delta z'_m$ ; при  $z'_m = (z'_m)_{\text{extr}} = 2\Delta z'_m$  остаточная меридиональная

составляющая астигматизма  $z'_{m0} = \Delta z'_m$ . В рассматриваемом случае  $z'_s \equiv 0$ . При этом остаточная сагиттальная составляющая астигматизма  $z'_{s0} \equiv -\Delta z'_m$ . Этот вариант компенсации меридиональной составляющей астигматизма назовём третьим вариантом компенсации.

Конструктивные параметры такой системы и остаточные aberrации образованного изображения представлены в табл. 3.

Рассмотренный характер компенсации меридиональной составляющей астигматизма позволил увеличить величину изображаемого предмета до  $2y = 60$  мм.

**Таблица 2.** Зеркальный репродукционный объектив-плананастигмат (линейное поле  $2y = 56$  мм)

Конструктивные параметры						
$N$ пов.	Радиусы, мм	$D$ , мм	Марки стекол	Показатель преломления	Световые диаметры, мм	Стрелки, мм
1	-200,000	-99,17		1,0000		
2	-100,830	99,17		-1,0000	95,10	-5,73
3	-200,000			1,0000	20,26	-0,51
				-1,0000	95,44	-5,78
Остаточные aberrации						
$S_0$ , мм	$S_p$ , мм	$S'_p$ , мм	$S'_0$ , мм	$V_0$	$V_p$	$S'$ , мм
-200,0	$\infty$	5874,0	-200,0	-1,000	0	-200,0
$y = 0$ , мм	$\sin\sigma$	$\Delta s'$	$\text{tg}\sigma'$	$\delta g'$	$W$	$\eta(\%)$
	0,100	0	-0,101	0	0	0
	0,0707	0	-0,0709	0	0	0
$y$ , мм	$S_p$ , мм	$S'_p$ , мм	$\text{tg}\sigma'_{gl}$	$y'$ , мм	$\Delta y'$	$Z'_m$
19,8	$\infty$	14568,0	-0,0013	-19,8	$-0,18 \times 10^{-4}$	0,0265
28,0	$\infty$	-29911	$0,942 \times 10^{-3}$	-28,0	$-0,12 \times 10^{-4}$	-0,0264

**Таблица 3.** Зеркальный репродукционный объектив-плананастигмат (линейное поле  $2y = 60$  мм)

Конструктивные параметры								
$N$ пов.	Радиусы, мм	$D$ , мм	Марки стекол	Показатель преломления	Световые диаметры, мм	Стрелки, мм		
1	-200,000	-98,86		1,0000				
2	-101,140	98,86		-1,0000	99,00	-6,22		
3	-200,000			1,0000	20,24	-0,51		
				-1,0000	98,98	-6,22		
Остаточные aberrации								
$S_0$ , мм	$S_p$ , мм	$S'_p$ , мм	$S'_0$ , мм	$V_0$	$V_p$	$S'$ , мм		
-200,0	$\infty$	4236,0	-200,0	-1,000	0	-199,9		
$y = 0$ , мм	$\sin\sigma$	$\Delta s'$	$\text{tg}\sigma'$	$\delta g'$	$W$	$\eta(\%)$		
	0,100	-0,0255	-0,101	0,00256	0,234	0		
	0,0707	-0,0255	-0,0709	0,00181	0,117	0		
$y$ , мм	$S_p$	$S'_p$ , мм	$\text{tg}\sigma'_{gl}$	$y'$ , мм	$\Delta y'$	$Z'_m$	$Z'_s$	$Z'_m - Z'_s$
21,2	$\infty$	8481,0	-0,0024	-21,2	$-0,63 \times 10^{-4}$	0,0263	-0,0255	0,0518
30,0	$\infty$	$-0,11 \times 10^7$	$0,267 \times 10^{-4}$	-30,0	$-0,11 \times 10^{-7}$	-0,0263	-0,0255	$-0,801 \times 10^{-3}$

Для осевой точки предмета, т.е. при  $y = 0$ , угол  $\varepsilon_1 = 0$ . При этом  $r_{20} = (1/2)r_1$ . При  $y \neq 0$  величина изменения радиуса кривизны второй поверхности равна

$$\delta r_2 = r_2 - r_{20} = \frac{r_1}{2} \left( \frac{1}{\cos \varepsilon_1} - 1 \right). \quad (13)$$

Применив выражение (4), получаем

$$\delta r_2 = \frac{1}{4r_1} y^2 + \frac{3}{16r_1^3} y^4 + \frac{5}{32r_1^5} y^6 + \dots \quad (14)$$

По сути дела, выражения (13) и (14) определяют сферическую aberrацию в изображении входного зрачка в плоскости апертурной диафрагмы. Преломляющая сферическая поверхность, концентричная осевой точке предмета, апланатична ей, но для лучей параллельного пучка (в рассматриваемом случае для пучка параллельных главных лучей) вносит в образованное изображение положительную сферическую aberrацию. Для компенсации сферической aberrации дополним исходную (при  $r_2 = r_{20}$ ) систему

**Таблица 4.** Зеркально-линзовый репродукционный объектив-плананастигмат (линейное поле  $2y = 50$  мм)

Конструктивные параметры						
N пов.	Радиусы, мм	D, мм	Марки стекло	Показатель преломления	Световые диаметры, мм	Стрелки, мм
				1,0000		
1	-97,830	2,17	K8	1,5183	68,46	-6,18
2	-100,000	100,00		1,0000	69,28	-6,19
3	-200,000	-100,00		-1,0000	90,02	-5,13
4	-100,000	100,00		1,0000	20,01	-0,50
5	-200,000	-100,00		-1,0000	90,00	-5,13
6	-100,000	-2,17	K8	-1,5183	69,28	-6,19
7	-97,830			-1,0000	68,45	-6,18
Остаточные aberrации						
$S_0$ , мм	$S_p$ , мм	$S'_p$ , мм	$S'_0$ , мм	$V_0$	$V_p$	$S'$ , мм
-97,83	$\infty$	6505,0	-97,83	-1,000	0	-97,83
$y = 0$ , мм	$\sin\sigma$	$\Delta s'$	$\text{tg}\sigma'$	$\delta g'$	$W$	$\eta(\%)$
	0,100	0	-0,101	0	0	0
	0,0707	0	-0,0709	0	0	0
$y$ , мм	$S_p$ , мм	$S'_p$ , мм	$\text{tg}\sigma'_{gl}$	$y'$ , мм	$\Delta y'$	$Z'_m$
17,2	$\infty$	12868,0	-0,0014	-17,7	$-0,16 \times 10^{-4}$	0,0241
25,0	$\infty$	$0,44 \times 10^7$	$-0,57 \times 10^{-5}$	-25,0	$-0,40 \times 10^{-9}$	$-0,142 \times 10^{-3}$

**Таблица 5.** Зеркально-линзовый репродукционный объектив-плананастигмат (линейное поле  $2y = 56$  мм)

Конструктивные параметры						
N пов.	Радиусы, мм	D, мм	Марки стекло	Показатель преломления	Световые диаметры, мм	Стрелки, мм
				1,0000		
1	-97,730	2,27	K8	1,5183	74,21	-7,32
2	-100,000	100,00		1,0000	75,13	-7,32
3	-200,000	-100,00		-1,0000	96,03	-5,85
4	-100,000	100,00		1,0000	20,09	-0,51
5	-200,000	-100,00		-1,0000	96,36	-5,89
6	-100,000	-2,27	K8	-1,5183	75,29	-7,36
7	-97,730			-1,0000	74,37	-7,35
Остаточные aberrации						
$S_0$ , мм	$S_p$ , мм	$S'_p$ , мм	$S'_0$ , мм	$V_0$	$V_p$	$S'$ , мм
-97,74	$\infty$	6222,0	-97,73	-1,000	0	-97,73
$y = 0$ , мм	$\sin\sigma$	$\Delta s'$	$\text{tg}\sigma'$	$\delta g'$	$W$	$\eta(\%)$
	0,100	0	-0,101	0	0	0
	0,0707	0	0,0709	0	0	0
$y$ , мм	$S_p$ , мм	$S'_p$ , мм	$\text{tg}\sigma'_{gl}$	$y'$ , мм	$\Delta y'$	$Z'_m$
19,8	$\infty$	15310,0	-0,0013	-19,8	$-0,16 \times 10^{-4}$	0,0254
28,0	$\infty$	-30838	$0,911 \times 10^{-3}$	-28,0	$-0,12 \times 10^{-4}$	-0,0255

**Таблица 6.** Зеркально-линзовый репродукционный объектив-плананастигмат (линейное поле  $2y = 60$  мм)

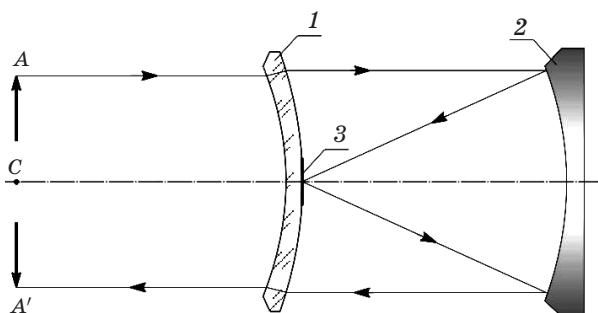
Конструктивные параметры								
N пов.	Радиусы, мм	$D$ , мм	Марки стекло	Показатель преломления	Световые диаметры, мм	Стрелки, мм		
				1,0000				
1	-96,960	3,04	K8	1,5183	77,89	-8,16		
2	-100,000	100,00		1,0000	79,17	-8,17		
3	-200,000	-100,00		-1,0000	100,37	-6,40		
4	-100,000	100,00		1,0000	20,02	-0,50		
5	-200,000	-100,00		-1,0000	100,35	6,40		
6	-100,000	-3,04	K8	-1,5183	79,17	-8,17		
7	-96,960			-1,0000	77,88	-8,16		
Остаточные aberrации								
$S_0$ , мм	$S_p$ , мм	$S'_p$ , мм	$S'_0$ , мм	$V_0$	$V_p$	$S'$ , мм		
-96,95	$\infty$	4575,0	-96,97	-1,000	0	-96,94		
$y = 0$ , мм	$\sin\sigma$	$\Delta s'$	$\text{tg}\sigma'$	$\delta g'$	$W$	$\eta(\%)$		
	0,100	-0,0245	-0,101	0,00246	0,225	$-0,11 \times 10^{-5}$		
	0,0707	-0,0245	-0,0709	0,00174	0,112	$-0,54 \times 10^{-6}$		
$y$ , мм	$s_p$	$S'_p$ , мм	$\text{tg}\sigma'_{gl}$	$y'$ , мм	$\Delta y'$	$Z'_m$	$Z'_s$	$Z'_m - Z'_s$
21,2	$\infty$	9036,0	-0,0023	-21,2	$-0,35 \times 10^{-4}$	0,0248	-0,0245	0,0493
30,0	$\infty$	$-0,35 \times 10^7$	$0,848 \times 10^{-5}$	-30,0	$-0,643 \times 10^{-4}$	-0,0248	-0,0245	$-0,254 \times 10^{-3}$

**Таблица 7.** Зеркально-линзовый репродукционный объектив-плананастигмат (линейное поле  $2y = 50$  мм)

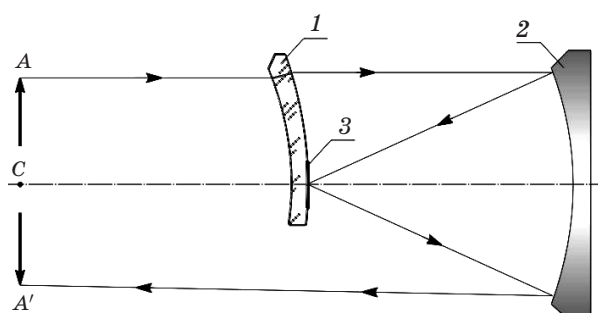
Конструктивные параметры						
N пов.	Радиусы, мм	$D$ , мм	Марки стекло	Показатель преломления	Световые диаметры, мм	Стрелки, мм
				1,0000		
1	-95,770	4,23	K8	1,5183	68,03	-6,24
2	-100,000	100,00		1,0000	69,66	-6,26
3	-200,000	-100,00		-1,0000	90,80	-5,22
4	-100,000	100,00		1,0000	20,41	-0,52
5	-200,000			-1,0000	89,22	-5,04
Остаточные aberrации						
$S_0$ , мм	$S_p$ , мм	$S'_p$ , мм	$S'_0$ , мм	$V_0$	$V_p$	$S'$ , мм
-95,77	$\infty$	6432,0	-200,00	-1,000	0	-200,00
$y = 0$ , мм	$\sin\sigma$	$\Delta s'$	$\text{tg}\sigma'$	$\delta g'$	$W$	$\eta(\%)$
	0,100	0	-0,101	0	0	0
	0,0707	0	-0,0709	0	$-0,12 \times 10^{-9}$	0
$y$ , мм	$S_p$ , мм	$S'_p$ , мм	$\text{tg}\sigma'_{gl}$	$y'$ , мм	$\Delta y'$	$Z'_m$
17,7	$\infty$	12862,0	-0,0014	-17,7	$-0,16 \times 10^{-4}$	0,0239
25,0	$\infty$	$-0,43 \times 10^7$	$0,582 \times 10^{-5}$	-25,0	$-0,42 \times 10^{-9}$	$-0,15 \times 10^{-3}$

концентрическим мениском, вторая преломляющая поверхность которого совмещена со второй отражающей поверхностью зеркальной системы, как показано на рис. 3.

Подбором толщины мениска легко компенсировать меридиональную составляющую астигматизма в изображении крайней точки предмета, т.е. получить первый вариант компенсации



**Рис. 3.** Схема оптической системы репродукционного объектива с концентрическим мениском в падающих и выходящих пучках лучей: 1 – концентрический мениск, 2 – главное зеркало, 3 – вторичное зеркало.



**Рис. 4.** Схема оптической системы репродукционного объектива с концентрическим мениском в падающих (или в выходящих) пучках лучей: 1 – концентрический мениск, 2 – главное зеркало, 3 – вторичное зеркало.

**Таблица 8.** Зеркально-линзовый репродукционный объектив-плананастигмат (линейное поле  $2y = 56$  мм)

Конструктивные параметры						
N пов.	Радиусы, мм	$D$ , мм	Марки стекла	Показатель преломления	Световые диаметры, мм	Стрелки, мм
				1,0000		
1	-95,580	4,42	K8	1,5183	73,76	-7,40
2	-100,000	100,00		1,0000	75,58	-7,41
3	-200,000	-100,00		-1,0000	96,96	-5,97
4	-100,000	100,00		1,0000	20,40	-0,52
5	-200,000			-1,0000	95,43	-5,78
Остаточные аберрации						
$S_0$ , мм	$S_p$ , мм	$S'_p$ , мм	$S'_0$ , мм	$V_0$	$V_p$	$S'$ , мм
-95,58	$\infty$	6135,0	-200,00	-1,000	0	-200,00
$y = 0$ , мм	$\sin\sigma$	$\Delta s'$	$\text{tg}\sigma'_{gl}$	$\delta g'$	$W$	$\eta(\%)$
	0,100	0	0,101	0	0	0
	0,0707	0	-0,0709	0	$-0,14 \times 10^{-9}$	0
$y$ , мм	$S_p$ , мм	$S'_p$ , мм	$\text{tg}\sigma'_{gl}$	$y'$ , мм	$\Delta y'$	$Z'_m$
19,8	$\infty$	15258,0	-0,0013	-19,8	$-0,16 \times 10^{-4}$	0,0254
28,0	$\infty$	-30906	$0,912 \times 10^{-3}$	-28,0	$-0,12 \times 10^{-4}$	-0,0255

аббераций. Конструктивные параметры такой системы и остаточные аберрации приведены в табл. 4.

Уменьшая толщину мениска, при  $2y = 56$  мм получаем второй вариант компенсации аберраций. Конструктивные параметры системы и остаточные аберрации изображения приведены в табл. 5.

Увеличивая толщину мениска, при  $2y = 60$  мм получаем третий вариант компенсации аберраций. Конструктивные параметры системы и остаточные аберрации изображения приведены в табл. 6.

Очевидным недостатком всех трёх вариантов рассмотренных оптических систем объектива

является малая толщина концентрического мениска. Изготовить такой мениск можно, но он крайне нетехнологичен в изготовлении. Толщину мениска можно примерно удвоить, если расположить его только в одной ветви оптической системы объектива, как показано на рис. 4. Конструктивные параметры системы при первом варианте компенсации астигматизма и остаточные аберрации представлены в табл. 7.

Конструктивные параметры системы при втором варианте компенсации астигматизма и остаточные аберрации изображения представлены в табл. 8.

Конструктивные параметры системы при третьем варианте компенсации астигматизма



**Таблица 9.** Зеркально-линзовый репродукционный объектив-плананастигмат (линейное поле  $2y = 60$  мм)

Конструктивные параметры								
$N$ пов.	Радиусы, мм		$D$ , мм	Марки стекол	Показатель преломления	Световые диаметры, мм		Стрелки, мм
					1,0000			
1	-94,100		5,90	К8	1,5183	77,29		-8,30
2	-100,000		100,00		1,0000	79,83		-8,31
3	-200,000		-100,00		-1,0000	101,75		-6,58
4	-100,000		100,00		1,0000	20,72		-0,54
5	-200,000				-1,0000	98,97		-6,22
Остаточные aberrации								
$S_0$ , мм	$S_p$ , мм		$S'_p$ , мм	$S'_0$ , мм	$V_0$	$V_p$		$S'$ , мм
-94,10	$\infty$		4472,0	-200,00	-1,000	0		-199,9
$y = 0$ , мм	$\sin\sigma$		$\Delta s'$	$\text{tg}\sigma'$	$\delta g'$	$W$		$\eta(\%)$
	0,100		-0,0247	-0,101	0,00248	0,227		0
	0,0707		-0,0247	-0,0709	0,00175	0,113		0
$y$ , мм	$S_p$	$S'_p$ , мм	$\text{tg}\sigma'_{gl}$	$y'$ , мм	$\Delta y'$	$Z'_m$	$Z'_s$	$Z'_m - Z'_s$
21,2	$\infty$	8906,0	-0,0023	-21,2	$-0,58 \times 10^{-4}$	0,0247	-0,0243	0,0494
30,0	$\infty$	$-0,21 \times 10^7$	$0,14 \times 10^{-4}$	-30,0	$-0,30 \times 10^{-8}$	-0,0243	-0,0243	0,00043

и остаточные aberrации изображения представлены в табл. 9.

Заметим, что добавление концентрического мениска в систему, схема которой представлена на

рис. 4, нарушает симметричность системы. Однако это не приводит к заметному изменению aberrаций широкого пучка лучей, хроматические aberrации достаточно малы и ими можно пренебречь.

\* \* \* \* \*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Чуриловский В.Н. Теория хроматизма и aberrаций третьего порядка. Л.: Машиностроение, 1968. 312 с.
2. Зверев В.А. Основы геометрической оптики. СПб.: СПб ГИТМО (ТУ), 2002. 218 с.
3. Грамматин А.П., Лустберг Э.А. Зеркальный репродукционный объектив "Авангард" // Оптико-механическая промышленность. 1975. № 6. С. 35-38.
4. Грамматин А.П. Свойства зеркального объектива "Авангард" // Оптический журнал. 1996. № 4. С. 40-45.
5. Грамматин А.П., Багдасаров А.А. Особенности использования трёхзеркального концентрического объектива при малом поле // Оптико-механическая промышленность. 1976. № 4. С. 19-22.
6. Русинов М.М. Техническая оптика: Учеб. пособие для вузов. Л.: Машиностроение, 1979. 488 с.