

# ОДНО- И ДВУХКОМПОНЕНТНЫЕ ОБЪЕКТИВЫ, ОКУЛЯРЫ И КОНДЕНСОРЫ С АСФЕРИЧЕСКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ ВТОРОГО ПОРЯДКА

© 2012 г. Л. Н. Андреев, доктор техн. наук; В. В. Ежова, аспирант

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: evv\_foist@mail.ru

Рассмотрены принципиальные оптические схемы и методика расчета систем с асферическими поверхностями второго порядка. Для иллюстрации приводятся конструктивные элементы и результаты абберационного расчета.

**Ключевые слова:** объектив, окуляр, конденсор, асферические поверхности, абберации.

Коды OCIS: 180.0180, 110.0180.

Поступила в редакцию 09.11.2011.

Применение асферических поверхностей в оптических системах позволяет повысить их оптические характеристики (относительное отверстие, угловое поле и др.), улучшить качество изображения (коррекцию аббераций), упростить оптическую схему (сократить количество линз). Общая теория аббераций третьего порядка оптических систем, содержащих линзы с асферическими поверхностями второго порядка, рассмотрена в [1, 2]. Относительное отверстие двухлинзовых склеенных объективов при удовлетворительной коррекции аббераций не превышает  $D/f = 1:5-1:4$ . Окуляры современных микроскопов также требуют улучшения качества изображения. Достаточно велики абберации изображения, образованного конденсорами, рассчитанными на минимум сферической абберации. Даже одна асферическая поверхность второго порядка позволяет существенно улучшить параметры названных оптических систем и повысить качество образованного ими изображения.

## Методика расчета

Расчет однокомпонентного объектива. У двухлинзовых склеенных объективов коррекции подлежат: сферическая абберация, кома и хроматизм положения. Коэффициенты аббераций третьего порядка  $S_1$  и  $S_2$ , определяющих сферическую абберацию и кому для тонкого компонента [1], определяются как  $S_1 = P$

и  $S_2 = HP + W$ , где  $W$  и  $P$  – основные параметры компонента,  $H$  – приведенная высота пересечения второго парааксиального луча с компонентом. Решая систему уравнений относительно основных параметров тонкого компонента, находим, что  $S_1 = P = 0$  и  $S_2 = HP + W = 0$ . При этом  $W = 0$  и  $P = 0$ .

В табл. 1 приведена зависимость основных параметров компонента  $P$  и  $W$  от формы и показателя преломления стекла  $n$  [5].

**Таблица 1.** Зависимость основных параметров компонента  $P$  и  $W$  от формы и показателя преломления стекла  $n$

Показатель преломления, $n$	Форма линзы					
	Выпукло-плоская		Двояково-выпуклая		Плосково-выпуклая	
	$W$	$P$	$W$	$P$	$W$	$P$
1,40	-0,78	3,68	1,36	4,15	3,50	12,25
1,45	-0,53	2,90	1,35	3,68	3,22	10,37
1,50	-0,33	2,32	1,33	3,32	3,00	9,00
1,55	-0,17	1,96	1,32	3,07	2,82	7,94
1,60	-0,03	1,62	1,31	2,84	2,67	7,11
1,65	0,07	1,50	1,30	2,66	2,54	6,44
1,70	0,16	1,36	1,29	2,52	2,43	5,90
1,75	0,24	1,26	1,28	2,39	2,33	5,44
1,80	0,30	1,17	1,28	2,38	2,25	5,06
1,85	0,37	1,11	1,27	2,33	2,18	4,74
1,90	0,42	1,06	1,27	2,27	2,11	4,46
1,95	0,46	1,03	1,26	2,21	2,05	4,21
2,00	0,50	1,00	1,25	2,00	2,00	4,00

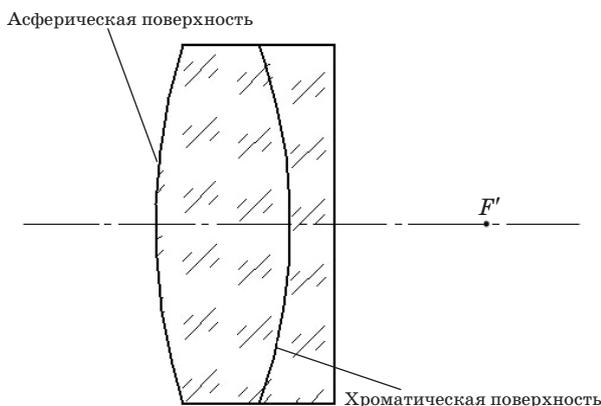


Рис. 1. Оптическая схема однокомпонентного объектива.

В качестве исходной оптической системы выбирается выпукло-плоская линза из стекла с показателем преломления  $n = 1,60-1,65$ , обращенная выпуклой поверхностью к плоскости предмета (рис. 1). У такой линзы, как видно из табл. 1, сферическая aberrация близка к минимуму ( $P$ ), а кома – к нулю ( $W$ ). Расчет объектива ведется в следующей последовательности [6]. Определяется радиус кривизны первой поверхности линзы

$$r_1 = f'(n - 1),$$

где  $f'$  – фокусное расстояние объектива,  $n$  – показатель преломления стекла.

Для ахроматизации изображения в систему вводится одна или две “хроматические” поверхности, разделяющие оптические среды, у которых показатели преломления для основной длины волны близки, а коэффициенты средней дисперсии различны. Наиболее широкое применение находят комбинации стекол СТК9-ТФ4 и ТК16-Ф1.

Для апохроматической коррекции aberrаций в качестве оптических сред линз следует использовать пары стекол, у которых кроме равенства показателей преломления и неравенства коэффициентов средней дисперсии равны относительные частные дисперсии. Для примера можно назвать такие пары стекол, как ОК1-ОФ1, ОК4-ЛК1.

В табл. 2 приведены оптические константы “хроматических” и “хроматическо-апохроматических” пар стекол – показатель преломления стекла  $n$ , коэффициент средней дисперсии  $\nu$ , относительная частная дисперсия  $p$ . Оптические константы приведены для длины волны  $\lambda = 546,07$  нм.

Таблица 2. Оптические константы “хроматических” и “хроматическо-апохроматических” комбинаций стекол

Марки стекла	Показатель преломления, $n$	Средняя дисперсия, $\nu$	Относительная частная дисперсия, $p$
ОФ3	1,615730	43,89	0,514
ТК14	1,615506	60,35	0,509
ТК16	1,615193	58,10	0,511
ОФ1	1,531924	51,58	0,512
ОК1	1,523894	75,99	0,509
ЛК1	1,441384	68,60	0,507
ОК4	1,448503	91,57	0,507
СТК3	1,662239	57,11	0,511
ОФ4	1,654189	43,26	0,515
СТК9	1,746048	50,05	0,512
ТФ4	1,746231	27,95	0,528

Радиус кривизны “хроматической” поверхности определяется из условия ахроматизации, используя выражение

$$r_{xp} = -\frac{(\nu_1 - \nu_2)}{\nu_2}(n - 1)f',$$

где  $\nu_1$  и  $\nu_2$  – коэффициенты средней дисперсии,  $n$  – показатель преломления для средней длины волны стекол,  $f'$  – фокусное расстояние объектива.

Для окончательной коррекции сферической aberrации первая сферическая поверхность заменяется асферической поверхностью второго порядка с уравнением

$$y^2 = 2r_0z - (1 - e^2)z^2,$$

где  $r_0$  – радиус кривизны при вершине поверхности,  $e^2$  – квадрат эксцентриситета поверхности,  $y, z$  – координаты асферической поверхности. Далее путем оптимизации величин  $e^2$  и “хроматического” радиуса добиваются оптимальной коррекции aberrаций объектива.

Расчет двухкомпонентного объектива. Оптическая схема такого объектива (рис. 2) включает одиночную линзу с асферической поверхностью, перед которой расположена плоскопараллельная пластинка, склеенная из “хроматической” или “хроматическо-апохроматической” комбинации стекол. Расчет одиночной линзы выполняется так же как в первом случае, а радиус “хроматической” поверхности определяется из условия ахроматизации

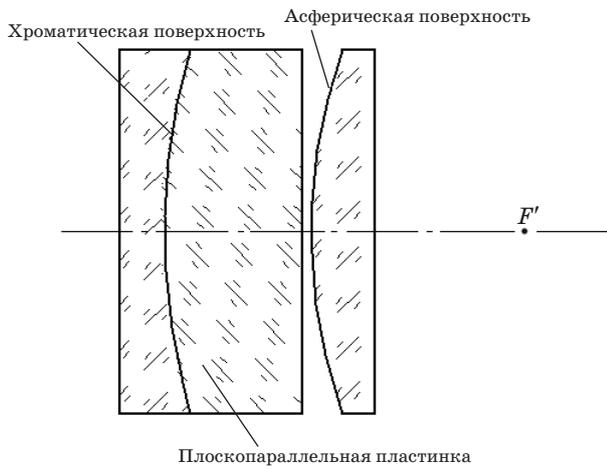


Рис. 2. Оптическая схема двухкомпонентного объектива.

$$r_{xp} = -f'(dn_2 - dn_1)v_3,$$

где  $f'$  – фокусное расстояние объектива,  $dn_1$  и  $dn_2$  – средние дисперсии стекол линз пластинки,  $v_3$  – коэффициент средней дисперсии одиночной линзы. Заметим, что кривизна поверхности и астигматизм у объективов с асферической поверхностью, как и у двухлинзовых склеенных объективов со сферическими поверхностями.

Расчет окуляра. У окуляров микроскопа коррекции подлежат полевые aberrации: астигматизм, дисторсия и хроматизм увеличения. Aberrации точки на оси незначительны из-за малости относительного отверстия окуляров [4]. Из рассмотрения коэффициентов aberrаций третьего порядка  $S_3$  и  $S_5$ , определяющих астигматизм и дисторсию тонкого компонента [1], следует, что

$$S_3 = H^2P + 2HW + 1,$$

$$S_5 = H^3P + 3H^2W + 3,7H.$$

Решив систему уравнений относительно основных параметров тонкого компонента, находим

$$S_3 = P - 2W + 1 = 0,$$

$$S_5 = -P + 3W - 3,7 = 0,$$

при  $W = 2,7$  и  $P = 4,4$ .

Наиболее близко этим требованиям удовлетворяет плоско-выпуклая линза из стекла с показателем преломления  $n = 1,6-1,7$  и обращенная плоской поверхностью к выходному зрачку [5] (табл. 1).

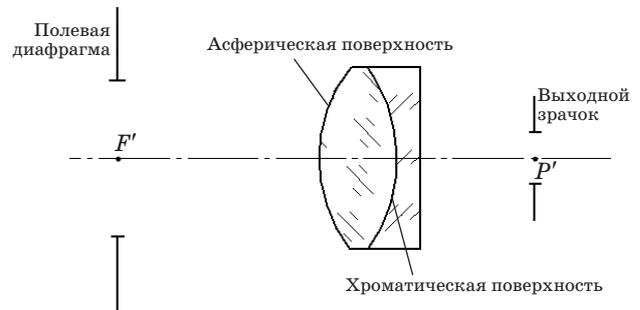


Рис. 3. Оптическая схема двухлинзового окуляра.

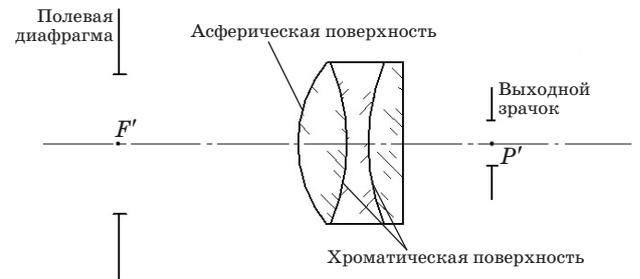


Рис. 4. Оптическая схема трехлинзового окуляра.

Радиус первой поверхности окуляра определяется из выражения

$$r_1 = f'(n-1) = \frac{250}{\bar{\Gamma}}(n-1),$$

где  $f'$  – фокусное расстояние окуляра,  $\bar{\Gamma}$  – видимое увеличение окуляра. Далее, путем асферизации первой поверхности линзы и интерполяции  $e^2$  добиваемся необходимой коррекции астигматизма и дисторсии. Хроматизм увеличения исправляется путем введения одной или двух “хроматических” поверхностей. Оптические схемы рассчитанных окуляров приведены на рис. 3 и 4.

Расчет конденсора. У конденсоров коррекции подлежат сферическая aberrация и кома. Наибольшее распространение получили конденсоры, рассчитанные на минимум сферической aberrации, однако у них кома достигает значительных величин.

Конденсор в виде одной выпукло-плоской линзы с асферической поверхностью рассчитывается как однокомпонентный объектив и обеспечивает удовлетворительную коррекцию при числовой апертуре не более  $A \leq 0,5$  (рис. 5). Для повышения числовой апертуры за

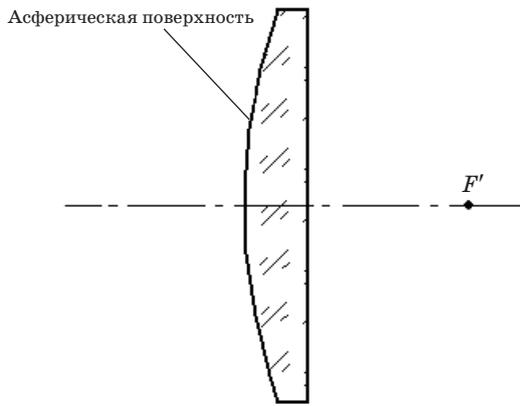


Рис. 5. Оптическая схема однокомпонентного конденсора.

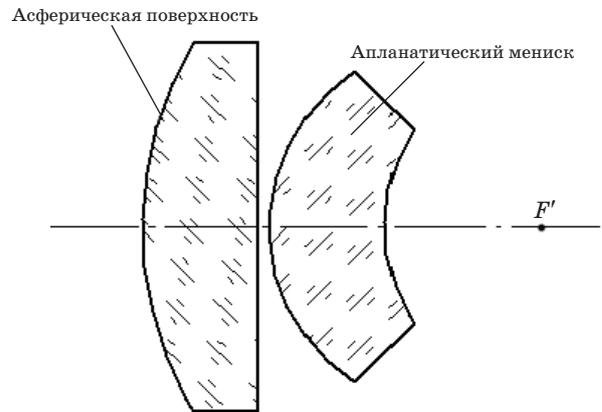


Рис. 6. Оптическая схема двухкомпонентного конденсора.

плоско-выпуклой линзой располагается апланатический мениск с линейным увеличением  $\beta = n^*$  (рис. 6). Фокусное расстояние плоско-выпуклой линзы определяется из выражения

$$f'_л = f'_к \cdot n,$$

где  $f'_л$  и  $f'_к$  – фокусные расстояния линзы и конденсора, соответственно,  $n$  – показатель преломления стекла апланатического мениска. Числовая апертура конденсора в этом случае может быть увеличена до  $A = 0,6-0,8$ .

### Результаты расчетов

В табл. 3 и 4 приведены конструктивные элементы и aberrации для точки на оси двухкомпонентного апохроматического объектива с  $f' = 100$  мм,  $D/f' = 1:2,5$ ,  $2\omega = 4^\circ$  (рис. 2).

В табл. 5 и 6 приведены конструктивные элементы и aberrации главного луча однокомпонентного окуляра с  $\bar{\Gamma} = 10^*$ ,  $2y' = 20$  мм, вычисленного в обратном ходе лучей (рис. 4).

В табл. 7 и 8 приведены конструктивные элементы и aberrации двухкомпонентного конденсора с  $f' = 30$  мм,  $A = 0,75$  (рис. 6).

Расчет всех приведенных систем был выполнен при их нахождении в воздухе.

Обозначения величин в табл. 3–8 [3]:  $h$  – относительная зрачковая координата,  $\Delta s'$  – продольная составляющая сферической aberrации,  $\Delta y'$  – поперечная составляющая сферической aberrации,  $\eta$  – отступление от условия неизопланатизма, определяющее кому,  $S'_{F'} - S'_{C'}$  – сферохроматическая aberrация,  $\sigma'$  – угол пересечения апертурного луча с оптической осью,  $\omega$  – угол пересечения главного луча

Таблица 3. Конструктивные параметры (апохроматический объектив)

Радиусы, мм	Осевые расстояния, мм	Марки стекол
$\infty$	5	ТФ4
72	15	СТК9
$\infty$	1	Воздух
61,3*	7	ТК14
$\infty$	—	—

\* асферическая поверхность,  $e^2 = 0,61$ .

Таблица 4. Aberrации точки на оси (апохроматический объектив)

$h$	$\text{tg}\sigma' \times 10^2$	$\Delta s'$ , мм	$\Delta y'$ , мм	$\eta$ , %
20,00	20,65	0,003	0,001	0,02
17,32	17,79	0,006	0,001	0,01
14,14	14,45	0,006	0,001	0
10,00	10,16	0,004	0	0
0	0	0	0	0

Таблица 5. Конструктивные параметры (однокомпонентный окуляр)

Радиусы, мм	Осевые расстояния, мм	Марки стекол
18,624*	7	СТК9
-30	3	ТФ4
30	5	СТК9
0	—	—

\* асферическая поверхность,  $e^2 = 1,23$ .

**Таблица 6.** Аберрации главного луча (однокомпонентный окуляр)

$\omega$	$s_p$ , мм	$s'_p$ , мм	$y'$ , мм	$z'_m$	$z'_s$	$z'_s - z'_m$	$\Delta y'/y'$ , %	$y'_{F'} - y'_{C'}/y'$ , %
-21°	24,04	-170	9,718	-1,24	-1,24	0	1,39	0,41
-15°	22,36	-170	6,825	-0,58	-0,57	0,01	0,71	0
0	20,68	-170	0	0	0	0	0	-0,43

**Таблица 7.** Конструктивные параметры (двухкомпонентный конденсор)

Радиусы, мм	Осевые расстояния, мм	Марки стекол
34,24*	10	ТК14
0	1	Воздух
16,46	10	СТК9
15,89	—	—

\* асферическая поверхность,  $e^2 = 0,60$ .

**Таблица 8.** Аберрации точки на оси (двухкомпонентный конденсор)

$h$	$\text{tg}\sigma' \times 10^2$	$\Delta s'$ , мм	$\Delta y'$ , мм	$\eta$ , %
22,50	14,00	-0,08	-0,09	-0,17
19,49	85,89	-0,04	-0,03	-0,24
15,91	64,79	-0,01	-0,01	-0,23
11,25	40,52	0	0	-0,15
0	0	0	0	0

с оптической осью,  $y'$  – величина изображения,  $z'_m$  – меридиональная составляющая астигматизма,  $z'_s$  – сагиттальная составляющая астиг-

матизма,  $z'_s - z'_m$  – астигматизм,  $\Delta y'/y'$  – относительная дисторсия,  $y'_{F'} - y'_{C'}/y'$  – хроматизм увеличения.

### Заключение

Анализируя результаты выполненных вычислений отметим, что применение асферических поверхностей позволяет существенно повысить параметры оптических систем и улучшить качество изображения. Применение даже одной асферической поверхности второго порядка в рассчитанных однокомпонентных и двухкомпонентных объективах позволило в два раза увеличить относительное отверстие при удовлетворительном качестве изображения.

Рассчитанные окуляры для микроскопа обладают анастигматической и ортоскопической коррекцией аберраций (астигматизма, дисторсии и хроматизма увеличения) и увеличенным линейным полем (коэффициент видимого поля  $K = 2y'\bar{\Gamma} > 175$ ), по сравнению с окуляром Гюйгенса.

Конденсоры с асферической поверхностью имеют существенно лучшую коррекцию аберраций и более простую конструкцию по сравнению с конденсорами, рассчитанными на минимум сферической аберрации.

\* \* \* \* \*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Слюсарев Г.Г. Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989. 379 с.
2. Русинов М.М. Композиция оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989. 383 с.
3. Вычислительная оптика. Справочник. Под общ. ред. М.М. Русинова. Издательство: Книжный дом “ЛИБРИКОМ”, 2009. 423 с.
4. Панов В.А., Андреев Л.Н. Оптика микроскопов. Л.: Машиностроение, 1976. 432 с.
5. Андреев Л.Н. Прикладная теория аберраций: Учебное пособие. СПб.: ГИТМО (ТУ), 2002. 100 с.
6. Андреев Л.Н., Ежова В.В. Двухлинзовые склеенные объективы с асферической поверхностью второго порядка // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2011. № 01(71). С. 134–136.