

---

---

# ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

---

---

УДК 535.317

Л. Н. АНДРЕЕВ, В. В. ЕЖОВА, Г. С. ДЕГТЯРЕВА

## МОДУЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Рассматривается принцип синтеза оптических модулей, их типы и коррекционные свойства. Приведены оригинальные оптические схемы и результаты абберационного расчета оптических систем различного назначения.

**Ключевые слова:** оптический модуль, абберации, асферика, объектив, окуляр, конденсор.

Модульный принцип проектирования оптических систем, базирующийся на использовании основ теории аббераций третьего порядка [1—6], заключается в том, что системы синтезируются из оптических элементов (модулей) с известными коррекционными свойствами.

В качестве оптических модулей при расчете оптических систем различного назначения, в том числе светосильных объективов, конденсоров, объективов и окуляров микроскопа, используются апланатические мениски с различным линейным увеличением, линзы с асферическими поверхностями второго порядка и гиперхроматические линзы.

Выражения для коэффициентов аббераций третьего порядка ( $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5$ ) определяют монохроматические абберации оптических систем, состоящих из тонких компонентов [1]:

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= \sum_{N=1}^{N=k} hP; \\ S_2 &= \sum_{N=1}^{N=k} HP - J \sum_{N=1}^{N=k} W; \\ S_3 &= \sum_{N=1}^{N=k} \frac{H^2}{h} P - 2J \sum_{N=1}^{N=k} \frac{H}{h} W + J^2 \sum_{N=1}^{N=k} \Phi; \\ S_4 &= \sum_{N=1}^{N=k} \Phi\pi, \quad \pi \approx \frac{1}{n} \approx 0,65; \\ S_5 &= \sum_{N=1}^{N=k} \frac{H^3}{h^2} P - 3J \sum_{N=1}^{N=k} \frac{H^2}{h^2} W + J^2 \sum_{N=1}^{N=k} \Phi(3 + \pi), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $N=1\dots k$  — число компонентов;  $h$  и  $H$  — высоты пересечения первого и второго параксиальных лучей с компонентами соответственно;  $\Phi$  — оптическая сила компонентов;  $J$  — инвариант Лагранжа — Гельмгольца;  $n$  — показатель преломления оптического элемента.

Из выражений системы (1), вытекает целесообразность синтеза оптических систем из апланатических компонентов (модулей), для которых  $W \approx P \approx 0$ .

Параметры конструктивных элементов апланатических менисков (рис. 1, а, б), для которых  $W = P = 0$ , вычисляются по формулам [1]

$$s = r \left( 1 + \frac{n'}{n} \right); \quad s' = r \left( 1 + \frac{n}{n'} \right), \quad (2)$$

где  $n'$  — показатель преломления среды, в которой находится мениск;  $n$  — показатель преломления для основной длины волны оптического материала мениска.

Радиусы линзы с асферической поверхностью второго порядка, для которой  $W = 0$  (см. рис. 1, в), вычисляются по формулам

$$r_1 = \frac{n^2 - 1}{n^2} f'; \quad r_2 = \frac{n^2 - 1}{n^2 - n - 1} f', \quad (3)$$

где  $f'$  — фокусное расстояние линзы, а  $n$  — показатель преломления оптического материала линзы с увеличением  $\beta = 1^\times/n$  для основной длины волны.

Путем замены первой сферической поверхности на асферическую второго порядка и интерполяции  $e^2$  достигается условие  $P = 0$ , т.е. линза становится апланатической.

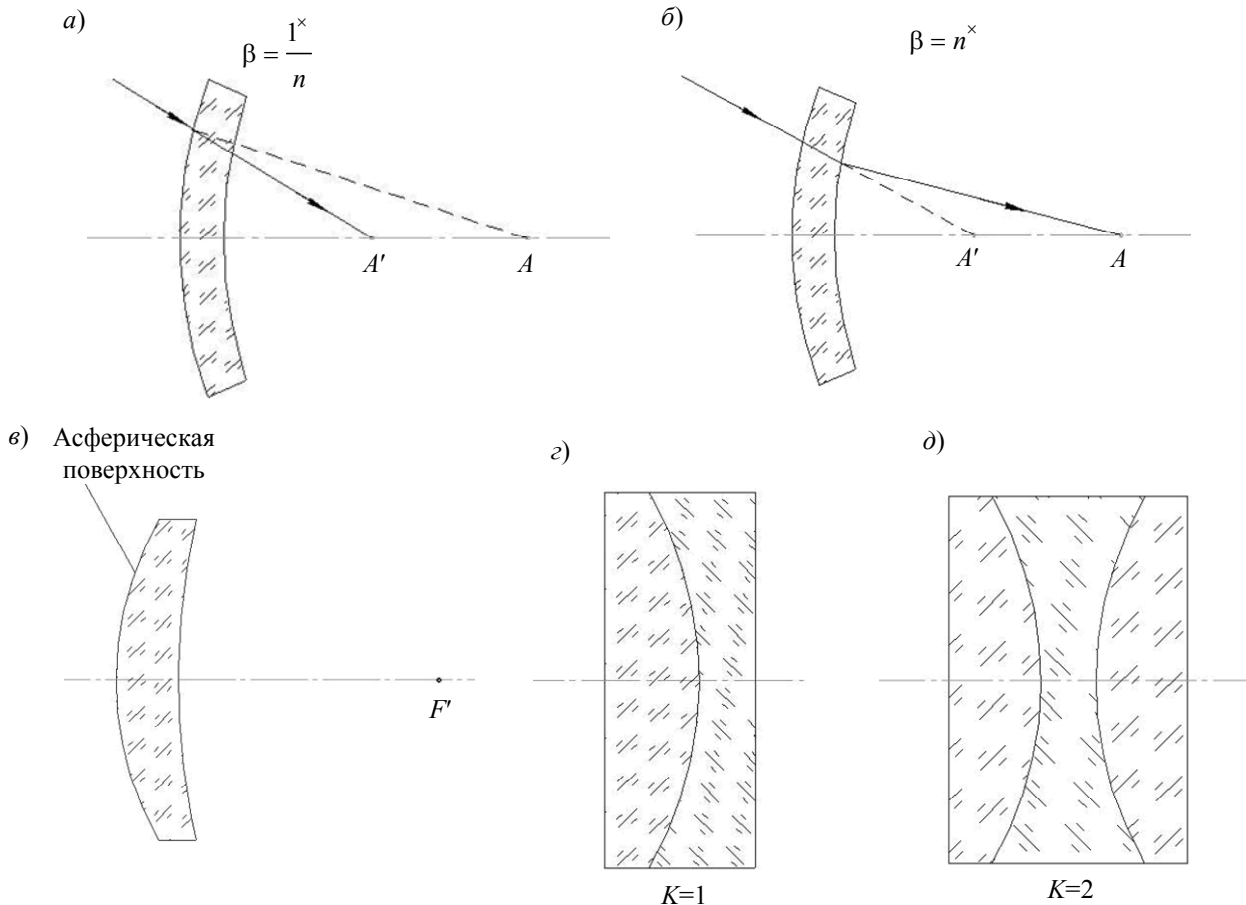


Рис. 1

Для коррекции хроматических aberrаций в оптическую систему вводится гиперхроматическая линза [3, 5], представляющая собой афокальную плоскопараллельную пластинку, склеенную из линз положительной и отрицательной оптической силы из оптических материалов, разность показателей преломления которых мала, а разности средних дисперсий значительны (см. рис. 1, з, д). Так как гиперхроматическая линза располагается перед объективом в параллельном ходе лучей, то она не вносит монохроматических aberrаций.

Хроматизм положения, вносимый гиперхроматической линзой в фокальную плоскость объектива, определяется выражением

$$ds' = f'_{06}{}^2 \frac{\Delta n}{r_{xp}} K, \quad (4)$$

где  $f'_{06}$  — фокусное расстояние объектива;  $\Delta n$  — разность средних дисперсий материалов гиперхроматической линзы;  $r_{xp}$  — радиус „хроматической“ поверхности;  $K$  — число „хроматических“ поверхностей.

При расчете конденсоров, как правило, коррекции подлежат сферическая aberrация и кома [1—3]. Оптическая схема конденсора включает одиночную линзу с асферической поверхностью второго порядка и с увеличением  $\beta = \frac{1^x}{n_1}$  в зависимости от числовой апертуры одного или нескольких апланатических менисков. В этом случае фокусное расстояние линзы с асферической поверхностью определяется как

$$f' = f'_k n_1^m, \quad (5)$$

где  $f'_k$  — фокусное расстояние конденсора,  $n_1$  — показатель преломления оптического материала апланатического мениска с увеличением  $\beta = \frac{1^x}{n}$ ,  $m$  — количество апланатических менисков.

На рис. 2, *a* и в табл. 1 приведены оптическая схема и aberrации конденсора с  $f' = 30$  мм,  $A = 0,75$ ,  $2\omega = 12^\circ$ .

При расчете светосильных объективов с небольшим полем ( $2\omega = 1 \dots 2^\circ$ ), кроме коррекции сферической aberrации и комы, необходима коррекция хроматических aberrаций, которая осуществляется путем размещения перед объективом гиперхроматической линзы (рис. 2, *б*) [7]. Остаточные aberrации объектива с  $f' = 100$  мм,  $D/f' = 1:2,5$ ,  $2\omega = 2^\circ$  приведены в табл. 2.

При расчете светосильных объективов с угловым полем  $2\omega = 6 \dots 10^\circ$  необходима коррекция полевых aberrаций, астигматизма и кривизны поверхности. На рис. 2, *в* приведена оптическая схема объектива с  $f' = 100$  мм,  $D/f' = 1:1,5$ ,  $2\omega = 10^\circ$  [8], содержащего гиперхроматическую линзу, плосковогнутую линзу с асферической поверхностью, два апланатических мениска с увеличением  $\beta = \frac{1^x}{n_1}$  и апланатический мениск с  $\beta = n_2^x$ . Апланатический мениск с увеличением  $\beta = n_2^x$  имеет отрицательную оптическую силу, благодаря чему и выполняется условие  $\sum \Phi = 0$  в системе уравнений (1), обеспечивающее коррекцию астигматизма ( $S_3$ ) и кривизны поверхности ( $S_4$ ). В этом случае фокусное расстояние линзы с асферической поверхностью определяется по формуле

$$f' = f'_{06} \frac{n_1^m}{n_2}, \quad (6)$$

где  $n_2$  — показатель преломления оптического материала апланатического мениска отрицательной оптической силы с увеличением  $\beta = n_2^x$ .

В табл. 3 и 4 приведены aberrации этого объектива.

На рис. 2, *г* и в табл. 5, 6 приведены оптическая схема и aberrации планохроматического объектива микроскопа с  $f' = 40$  мм,  $A = 0,15$ ,  $2\omega = 6^\circ$ . Для увеличения числовой апертуры в оптическую схему следует ввести апланатические мениски с линейным увеличением  $\beta = n^x$ .

У окуляров микроскопа коррекции подлежат полевые aberrации: астигматизм, дисторсия, хроматизм увеличения.

Из системы уравнений (1) следует, что при  $W = 2,7$  и  $P = 4,4$  [6]

$$S_3 = -P - 2W + 1 = 0, \quad S_5 = -P + 3W - 3,7 = 0. \quad (7)$$

Наиболее близко этим требованиям удовлетворяет оптическая система в виде плоско-выпуклой линзы, обращенной плоской поверхностью к выходному зрачку. Путем замены сферической поверхности на асферическую второго порядка достигается оптимальная коррекция астигматизма и дисторсии. Введение в оптическую схему окуляра гиперхроматической линзы позволяет исправить хроматизм увеличения.

На рис. 2,  $\delta$  и в табл. 7 приведены оптическая схема и aberrации широкоугольного окуляра микроскопа с увеличенным удалением выходного зрачка:  $\bar{\Gamma} = 10^\times$ ,  $2y' = 20$  мм [9].

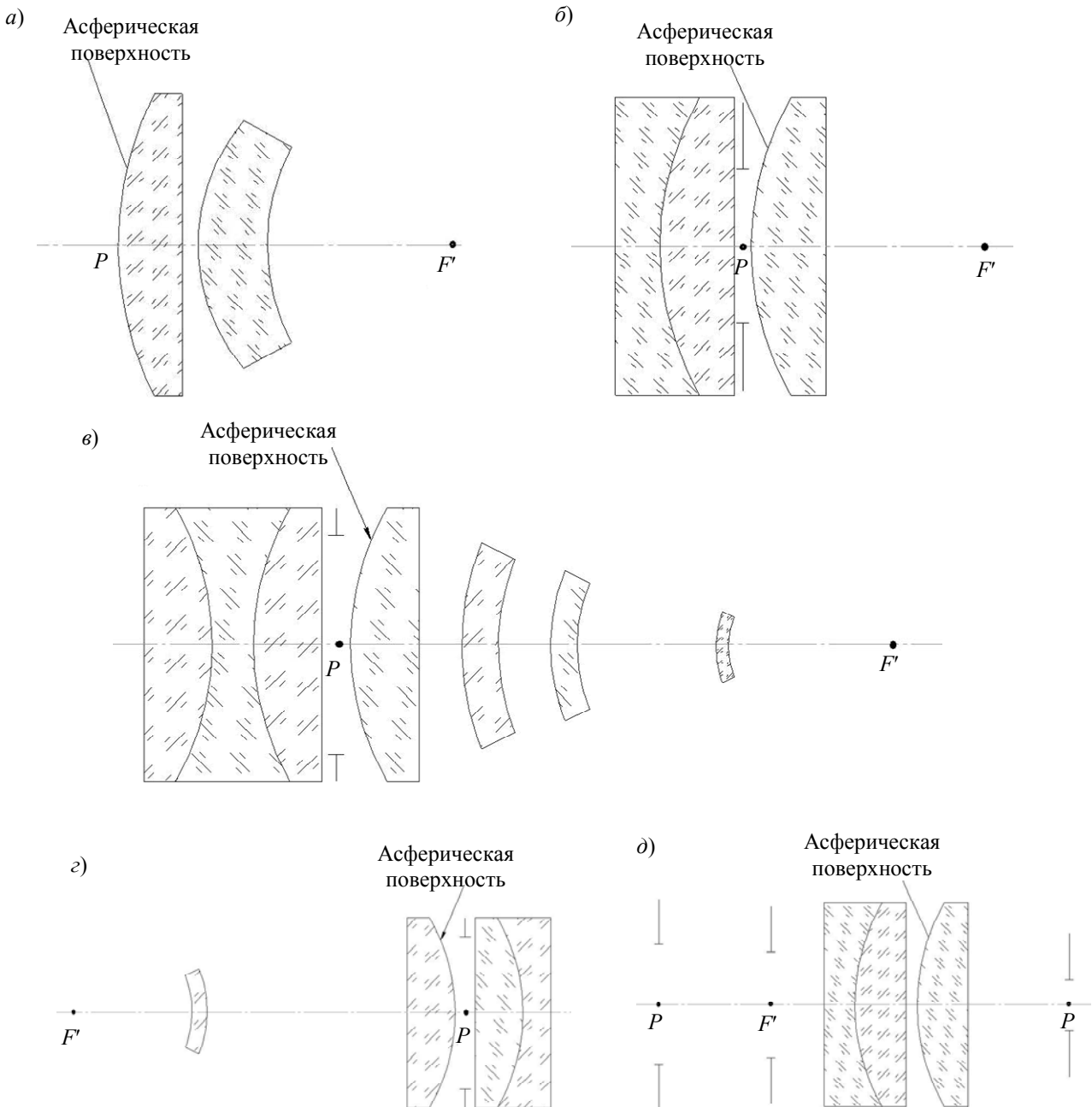


Рис. 2

Таблица 1

$h$	$\text{tg } \sigma'$	$\Delta s'$ , мм	$\Delta y'$ , мм	$\eta$ , %	$S'_{F'} - S'_{C'}$ , мм
22,5	1,4	-0,08	-0,09	-0,17	-0,42
15,9	0,65	-0,01	0	-0,23	-0,46
0	0	0	0	0	-0,49

Таблица 2

$h$	$\text{tg } \sigma'$	$\Delta s'$ , мм	$\Delta y'$ , мм	$\eta$ , %	$S'_{F'} - S'_{C'}$ , мм
20	0,21	-0,02	-0,004	-0,04	0,007
14	0,14	0	0	-0,03	0,003
0	0	0	0	0	0,001

Таблица 3

$h$	$\text{tg } \sigma'$	$\Delta s'$ , мм	$\Delta y'$ , мм	$\eta$ , %	$S'_{F'} - S'_{C'}$ , мм
25	0,26	-0,01	-0,002	-0,05	0,11
17,5	0,18	0,005	0,001	-0,03	0
0	0	0	0	0	-0,08

Таблица 4

$\omega$	$y'$ , мм	$z'_s$ , мм	$z'_m$ , мм	$z'_s - z'_m$ , мм
-5°	8,988	0,01	0,01	0
-3°30'	6,268	-0,02	-0,08	0,06
0	0	0	0	0

Таблица 5

$h$	$\text{tg } \sigma'$	$\Delta s'$ , мм	$\Delta y'$ , мм	$\eta$ , %	$W_e$	$W_{F'}$	$W_{C'}$
6	0,15	-0,016	-0,002	0,02	-0,06	0,51	0,39
4,2	0,10	-0,001	0	0,01	0,01	0,12	0,37
0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 6

$\omega$	$y'$ , мм	$z'_s$ , мм	$z'_m$ , мм	$z'_s - z'_m$ , мм
-3°	2,15	0,006	-0,003	0,009
-2°	1,40	0,002	-0,005	0,007
0	0	0	0	0

Таблица 7

$\omega$	$s_p$ , мм	$s'_p$ , мм	$y'$ , мм	$z'_s$ , мм	$z'_m$ , мм	$z'_s - z'_m$ , мм	$\Delta y'/y'$ , %
-21°	-29,6	147	9,90	-1,28	-1,28	0	1,4
-15°	-28,0	147	6,95	-0,59	-0,59	0	0,7
0	-26,4	147	0	0	0	0	0

Примечание. В табл. 1—7 приняты следующие обозначения:  $\sigma'$  — апертурный угол;  $\Delta s'$  и  $\Delta y'$  — продольная и поперечная составляющие сферической аберрации;  $\eta$  — отступление от условия неизопланатизма, определяющее кому;  $S'_{F'} - S'_{C'}$  — хроматизм положения;  $W_e$ ,  $W_{F'}$ ,  $W_{C'}$  — волновые аберрации, вычисленные в долях длины волны;  $\omega$  — угол пересечения главного луча с оптической осью;  $y'$  — размер изображения;  $z'_m$  и  $z'_s$  — меридиональная и сагиттальная составляющие астигматизма;  $z'_s - z'_m$  — астигматизм;  $s_p$  и  $s'_p$  — положение входного и выходного зрачка.

Итак, показана эффективность применения апланатических оптических модулей при расчете различных оптических систем. Использование апланатических модулей расширяет допуски при изготовлении и сборке оптических систем.

Рассчитанные объективы и окуляр имеют оригинальные оптические схемы и защищены патентами Российской Федерации [7—12].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Слюсарев Г. Г.* Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989.
2. *Русинов М. М.* Композиция оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989.
3. *Панов В. А., Андреев Л. Н.* Оптика микроскопов. Л.: Машиностроение, 1976.
4. *Зверев В. А., Точилина Т. В.* Опотехника проектирования оптических приборов. СПб: СПб ГИТМО, 2005.
5. *Андреев Л. Н.* Прикладная теория аберраций: Учеб. пособие. СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2002.
6. *Андреев Л. Н., Ежова В. В.* Прикладная теория аберраций: Учеб. пособие. СПб: НИУ ИТМО, 2011. Ч. II.
7. Пат. 100300 РФ, G02B 9/04. Двухлинзовый объектив / *Л. Н. Андреев, В. В. Ежова*. 15.07.2010.
8. Пат. 121089 РФ, G02B 9/04. Объектив / *Л. Н. Андреев, С. В. Куцевич*. 10.05.2012.
9. Пат. 100640 РФ, G02B 25/00, на полезную модель „Окуляр микроскопа“ / *Л. Н. Андреев, В. В. Ежова*. 15.07.2010.
10. Пат. 126482 РФ, G02B 25/00, на полезную модель „Окуляр микроскопа“ / *Л. Н. Андреев, А. Н. Пригода*. 22.02.2012.
11. Пат. 130417 РФ, G02B 13/00, на полезную модель „Объектив“ / *Л. Н. Андреев, В. В. Ежова, С. В. Куцевич, Г. С. Дегтярева*. 20.07.2013.
12. Пат. 133947 РФ, G02B 9/12, на полезную модель „Афокальный компенсатор сферической аберрации“ / *Л. Н. Андреев, В. В. Ежова, Г. С. Дегтярева*. 31.05.2013.

#### *Сведения об авторах*

- Лев Николаевич Андреев** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики
- Василиса Викторовна Ежова** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: evv\_foist@mail.ru
- Галина Сергеевна Дегтярева** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики

Рекомендована кафедрой  
прикладной и компьютерной оптики

Поступила в редакцию  
22.02.13 г.